

**ANÁLISIS MULTIOBJETIVO PARA LA OPTIMIZACIÓN EN
SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA**

**Tesis Doctoral
Programa de Ingenierías
Área: Sistemas Energéticos**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
MEDELLÍN
2010**

ANÁLISIS MULTIOBJETIVO PARA LA OPTIMIZACIÓN EN SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

**Tesis Doctoral
Programa de Ingenierías
Área: Sistemas Energéticos**

**Marlon José Bastidas Barranco
Autor**

**Ph.D. Patricia Jaramillo
Director**

**Ph.D. Farid Chejne Janna
Codirector**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
MEDELLÍN
2010**

*A la memoria de mi madre y a mi familia
siempre han estado bien cerca....*

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente, darle gracias a Dios por permitirme culminar esta etapa importante de mi vida. Deseo expresar toda mi gratitud y reconocimiento a mis tutores Dra. Patricia Jaramillo Alvarez y Dr. Farid Chejne Janna, porque en conjunto realizaron una labor de acompañamiento excepcional. A Patricia por involucrarme sabiamente dentro de las metodologías de optimización heurísticas relacionadas con la estocástica y a Farid porque sembró en mí la llama de la curiosidad en la investigación energética y porque ha sido desde hace muchos años como un padre que me señala el camino a seguir. De verdad muchas gracias a ambos por confiar en que podía sacar este trabajo adelante.

Quiero reconocer los méritos y expresar mis más sinceros agradecimientos al Dr. Blas Galván González, porque dedicó su valioso tiempo en enseñarme de manera fácil, el mundo complejo de los algoritmos genéticos, sin embargo considero que Blas, más que un buen tutor es un excelente amigo para mí.

No puedo dejar de manifestar mis agradecimientos a todos mis compañeros investigadores, algunos que ya pasaron por esta etapa y otros que la comienzan; por el apoyo, los consejos y el ánimo que me dieron, sobre todo en los momentos de flaqueza y angustia. Pero también compartieron incondicionalmente conmigo, momentos alegres y de tranquilidad. Son muchos en la lista de amigos, pero quiero mencionar especialmente al Msc. Raúl Bermúdez que siempre estuvo cuando necesité de su compañía y sus buenos consejos; Dr. Farid Cortés con quien compartí momentos difíciles; Luis Carlos Díaz y Luis Carlos Angulo con quienes inicié este camino de la investigación, y así muchos más que por cuestiones que limitan estas líneas se me hace imposible plasmar. De manera especial debo agradecer a todo el Grupo de Energías Alternativas y Biomasa de la Universidad Popular del Cesar, por acompañarme de cerca en todo este proceso.

Quiero agradecer a mi familia, a Celena mi esposa, por la paciencia que tuvo y el apoyo que me dio siempre; a mis hijos Marlon José y Marlys Yisell porque a pesar que dejé de dedicarles mucho tiempo, entendieron la importancia de este trabajo para mí, nunca tendré como pagarles; a mi padre Ricardo y a todos y cada uno de mis hermanos.

Por último, le agradezco a COLCIENCIAS por la financiación de los doctorados nacionales y la posibilidad de compartir con muchos investigadores los resultados de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1. INTRODUCCION	Pag. 1
1.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA TERMODINÁMICA	3
1.1.1 El concepto de exergía	5
1.1.2 Eficiencia exergética y energética	6
1.1.3 Las relaciones de exergía	7
1.1.3.1 Relaciones de flujo de calor y de flujo de trabajo	7
1.1.3.2 Relaciones de propósito y eficiencia	8
1.1.3.3 Eficiencia y costo exergético	9
1.2 ESTADO DEL ARTE	11
1.2.1 Desarrollo de la Optimización Termoeconómica	11
1.2.2 Desarrollo de la Optimización Multiobjetivo	12
1.3 ESTRUCTURA Y ALCANCE DE LA TESIS	13
Capitulo 2. NUEVOS PARAMETROS EXERGOECONÓMICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS	16
INTRODUCCION	16
2.1 PRINCIPALES MÉTODOS DE OPTIMIZACION ENERGÉTICA	17
2.2 EL ENTORNO DE UN SISTEMA ENERGÉTICO	18
2.3 MÉTODO DE OPTIMIZACION POR CAPITAL TOTAL DE INVERSION (TCI)	19
2.3.1 Descripción General del Modelo Termoeconómico.	19
2.3.2 Ventajas y Desventajas del modelo termoeconómico	23
2.3.3 Evaluación de las constantes de la ecuación CTI	26
RESUMEN	32
Capítulo 3. ANALISIS MULTIOBJETIVO PARA LA OPTIMIZACION DE SISTEMAS ENERGETICOS	34
INTRODUCCION	34
3.1 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MULTIOBJETIVO (MO)	36
3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA TÉRMICO MULTIOBJETIVO (MO)	39
3.2.1 Descripción de los objetivos en el problema MO	40
3.2.2 Representación gráfica de los objetivos del sistema energético	44
3.3 ANÁLISIS MO AL SISTEMA INTEGRADO	48
3.3.1 Aplicación de los Algoritmos Evolutivos	49
3.3.2 Análisis y Evaluación Exergoeconómica	51
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
3.4.1 Resultados Debido al Análisis Multiobjetivo	56
3.4.2 Resultados debido a partir del análisis por equipos con la ecuación de inversión.	59

RESUMEN	62
Capítulo 4. OPTIMIZACIÓN TERMOECONÓMICA, TECNOLÓGICA Y AMBIENTAL CON ALGORITMOS GENÉTICOS MULTIOBJETIVO	63
INTRODUCCION	63
4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO PARA EL ANÁLISIS MULTIOBJETIVO	63
4.1.1 Objetivo Termoeconómico	64
4.1.2 Objetivo Tecnológico	65
4.1.3 Objetivo Ambiental	68
4.1.4 Modelo Termodinámico y Económico	68
4.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
RESUMEN	74
Capítulo 5. OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS COMPLEJOS BAJO INCERTIDUMBRE	76
INTRODUCCION	76
5.1 DEFINICION DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL SISTEMA	77
5.1.1 Descripción del Sistema y Variables Internas	78
5.1.2 Variables Externas del Sistema Energético	79
5.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA	81
5.2.1 Capital Total Invertido (CTI)	83
5.2.2 Costo del Producto (C_p)	84
5.2.3 Alternativas de Inversión Probables	84
5.2.3.1 Métodos de Análisis Económico.	85
5.2.3.2 Experimento de Simulación.	86
5.2.3.3 Análisis Económico y Matemático en la Instalación de un SE.	87
5.2.3.4 Solución Integral del Modelo Económico.	89
5.2.3.5 Solución Discreta del Modelo Económico.	90
5.2.3.6 Árbol General de Dependencia de Variables.	91
5.3 Métodos de Solución Simulación+Optimización	92
5.3.1 Algoritmo Evolutivo para Optimización Multiobjetivo (MOEA)	92
5.3.2 Toma de Decisiones Multicriterio	95
5.3.3 Generalidades sobre la Incertidumbre	97
5.4. DESCRIPCION GENERAL DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACION	100
5.4.1 Criterios de Incertidumbre	106
5.4.1.1 Criterios para Caracterizar una Alternativa Bajo Riesgo	106
5.5. RESULTADOS Y DISCUSION	109
5.5.1 Análisis Estadístico de los Resultados	114
5.5.2. Selección de la Alternativa Óptima por Análisis Multicriterio	116
RESUMEN	118
Capítulo 6. CONCLUSIONES	119

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 2.1. Valores típicos del exponente m de la ecuación de capital total invertido para varios equipos térmicos	25
Tabla 2.2. Valores típicos del exponente m de la ecuación de capital total invertido para varias plantas completas	26
Tabla 2.3. Valores de las constantes de la ecuación de TCI, para el CGAM	26
Tabla 2.4. Condiciones de operación (CO) y costos de inversión calculados de acuerdo a la Ecuación 1.10 para el compresor de aire en el CGAM	27
Tabla 2.5. Costos de Inversión calculados a partir de la ecuación de capital total invertido para B , n y m obtenidas por PS y Tsatsaronis et al. (1993)	27
Tabla 2.6. Resultados de la inversión con respecto a parámetros exergoerconómicos calculados por ecuaciones lineales para los casos de 1 al 3	32
Tabla 3.1. Propiedades de estado y exergía del sistema correspondiente a la Fig. 3.1.	49
Tabla 3.2. Parámetros requeridos por los objetivos del problema	49
Tabla 3.3. Definición de recurso (F) – producto (P) – residuo (R) para el sistema de la figura	54
Tabla 3.4. Valores B , n y m para las ecuaciones 4.26 a 4.32.	56
Tabla 3.5. Costos de las corrientes del sistema	61
Tabla 4.1. Constantes de la ecuación 4.4 para SC y SCC	67
Tabla 4.2. Carbones de diferentes regiones de Colombia	68
Tabla 4.3. Propiedades de las corrientes del sistema convencional (Termocesar)	69
Tabla 4.4. Propiedades de las corrientes del Ciclo Combinado	70
Tabla 4.5. Definición de F-P-R para Termocesar (convencional)	71
Tabla 4.6. Definición de F-P-R para Ciclo Combinado (mejor eficiencia)	71
Tabla 4.7. Ensayos del algoritmo evolutivo para diferentes pesos	74
Tabla 5.1. Palabras claves para analizar la incertidumbre (Salazar, 2008)	98
Tabla 5.2 Diversas Aplicaciones de la Incertidumbre	99
Tabla 5.3. Distribución de frecuencias y probabilidades del precio del producto	102
Tabla 5.4. Ventajas y desventajas de los criterios de decisión	109
Tabla 5.5 Resultados de la simulación a diferentes precios del producto	110
Tabla 5.6. Variables de Operación Óptimas para Diferentes Autores	113
Tabla 5.7. Desviación Estándar del VPN para el 100% y el 90% de los	115

Datos de la Simulación	
Tabla 5.8. Promedio y Desviación Estándar de las Variables de Decisión del Sistema Energético	115
Tabla 5.9. Soluciones Óptimas con Diferente Juego de Pesos en los Criterios	117

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1. Diagrama de un sistema de cogeneración - CGAM	17
Figura 2.2. Relación del cociente de ingresos con la eficiencia exergética a partir de la ecuación de capital total invertido	29
Figura 2.3. Cociente de las inversiones vs eficiencia exergética para evaluación de las constantes B , n y m en los casos PS y Tsatsaronis et al. (1993)	30
Figura 2.4. Cociente de las inversiones vs eficiencia exergética para evaluación de \hat{B} , \hat{n} y \hat{m} con \hat{E}_p constante	32
 Figura 3.1. Representación de las soluciones no dominadas	 37
Figura 3.2. Representación de un Sistema GAP Multiobjetivo en un Entorno Probable	38
Figura 3.3. Planta de cogeneración (Subsistema I) integrada a un gasificador (Subsistema II)	39
Figura 3.4. Representación del Objetivo Termoeconómico	45
Figura 3.5. Descripción del Objetivo Tecnológico	46
Figura 3.6. Utilidad contra ahorro a composición de combustible variable	47
Figura 3.7. Evaluación del objetivo tecnológico	48
Figura 3.8. Diagrama de flujo del AG con fitness en función de pesos de importancia	50
Figura 3.9. Algoritmo genético con evaluación de matriz de exergía	55
Figura 3.10. Utilidad contra ahorro a composición de combustible (a) constante y (b) variable	57
Figura 3.11. a) Ahorro contra producción de residuos. b) Utilidad contra costos de combustible - de inversión y O&M	57
Figura 3.12. Generaciones de optimización con pesos	58
Figura 3.13. Curva de Óptimos de Pareto a partir de pesos	59
 Figura. 4.1. Estructura de teórica de Termocesar para 300 MW	 66
Figura. 4.2. Estructura de 300 MW con mejora tecnológica	67
Figura 4.3. Esquema de distribución de costos entre un sistema convencional y un sistema eficiente	72
Fig. 4.4. Optimización evolutiva para diferentes individuos y generaciones	73
 Figura 5.1. Precio de la energía eléctrica en la bolsa (\$/kWh), 2003-2008	 79
Figura 5.2. Distribución del Precio en Bolsa (\$/kWh) de Energía Eléctrica en Colombia	80
Figura 5.3. Flujo de costo e ingresos involucrados en el análisis económico	82
Figura 5.4. Comparación de los diversos métodos de análisis de	86

inversiones	
Figura 5.5. Fases de la planificación.	87
Figura 5.6. Fases de vida de una instalación	88
Figura 5.7. Proceso resolvente integral	90
Figura 5.8. Proceso de solución discreto	91
Figura 5.9. Proceso general de la simulación	91
Figura 5.10. Modelo de Simulación+Optimización	93
Figura 5.11. Esquema del Algoritmo NSGA-II	94
Figura 5.12. Visión sistémica de las instancias y fuentes de incertidumbre: el sistema (arriba) y su representación funcional (abajo)	99
Figura 5.13. Primer Paso para Utilizar el Software TOPSIS.	103
Figura 5.14. Segundo Paso para Utilizar el Software TOPSIS	104
Figura 5.15. Tercer Paso para Utilizar el Software TOPSIS	104
Figura 5.16. Modelo Jerarquizado del Problema Multiobjetivo con una Variable Incierta	105
Figura 5.17. Ejemplo de Aplicación del Criterio de Robustez	108
Figura 5.18. Comportamiento de los Objetivos para Precios Probables de Producto	111
Figura 5.19. Distribución de Puntos Óptimos de los Objetivos del Problema con Variable Incierta en la Función Objetivo Termoeconómica	113
Figura 5.20. Distribución porcentual del rango de valores del VPN obtenido por la simulación de los precios del producto y la optimización del sistema energético.	114

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCION

El propósito central de la Termodinámica es la conversión de la energía calorífica en trabajo mecánico, aspecto que sumerge sus raíces en los finales del siglo XVIII con los experimentos sobre el calor del conde Rumford, famoso filósofo natural que demostró con sus ingeniosos experimentos que la gran cantidad de calor excitada por la horadación de un cañón no puede asociarse a un cambio que tiene lugar en la capacidad calorífica del metal, sino al movimiento del taladro que se transmite a las partículas del metal, produciéndose así el fenómeno de transferencia de calor. Pero los estudios decisivos que condujeron a establecer la equivalencia entre el trabajo mecánico y el calor fueron realizados en 1840 por James Joule en la Gran Bretaña. Tales estudios estuvieron inspirados en los trabajos que Rumford había llevado a cabo casi cincuenta años antes. En un trabajo intitulado “El equivalente mecánico de calor”, que data de 1843 y que fue publicado en 1850, Joule presentó evidencia inequívoca justificando las conclusiones de Rumford (García, 1997).

El experimento de Joule fue una verdadera proeza de precisión y de ingenio considerando los medios de que se disponían en esa época y fue el principio que dio origen al concepto de exergía, que es la parte de la energía que puede convertirse en trabajo mecánico, fue descubierta en la termodinámica casi desde sus orígenes formales, con el nombre de “trabajo disponible”. Hoy en día cobra una enorme importancia, por un lado, porque la exergía, siendo la medida cuantitativa de la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un desequilibrio entre un sistema físico y el ambiente que lo rodea, o entorno, determina cuantitativamente el valor termodinámico de cualquier recurso; y, por otro lado, permite analizar rigurosamente el desperdicio de los recursos en las actividades de una sociedad, estableciendo pautas cuantitativas para su ahorro y uso eficiente. No es extraño que el concepto haya resurgido plenamente en los países industrializados altamente consumidores de recursos, a raíz del embargo petrolero que en su contra ejercieron los miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) a principios de la década de los setentas (Sotolongo et al., 2002). Por otra parte, la Termodinámica que estudia los procesos de transformación de energía, permite a través de su Segundo Principio cuantificar la cantidad de recursos naturales consumidos en un proceso determinado, y por tanto saber cuánto cuesta en términos de recursos consumidos. Ante esto, es claro que existe una relación entre la física y la economía.

Un sistema energético evaluado desde el punto de vista de la Termodinámica, permite establecer la cantidad ideal en la distribución de los flujos totales de energía (Primera Ley) con lo que se identifica pérdidas de energía; sin embargo, este análisis no es suficiente para estimar las magnitudes más significativas de las verdaderas ineficiencias termodinámicas-VIT y de los flujos de energía disponibles para producir trabajo, las cuales pueden ser estudiadas teniendo en cuenta las irreversibilidades del sistema (Segunda Ley) (Frangopoulus et.al., 2002). Las VIT están asociadas con los costos de los equipos, costos de operación

y mantenimiento, por lo que los análisis de este orden, se han desarrollado dentro del contexto de la reducción de los costos y de las ineficiencias, simultáneamente (Bejan et.al., 1996). A pesar de no se puede asegurar una reducción de costos mediante una reducción de ineficiencias, se ha encontrado que a través de metodologías para la optimización exergética, los sistemas pueden alcanzar un punto de bajo costo de operación a una eficiencia razonable (Garduno-Ramirez y Lee, 2001). De esta manera, actualmente el análisis de un sistema energético se desarrolla bajo dos criterios fundamentales; en primer lugar los balances económicos que implica la generación de energía de alta calidad y en segundo lugar los factores que contribuyen a la formación de las VIT, teniendo en cuenta que estas últimas son derivadas de las irreversibilidades estudiadas desde el punto de vista de la segunda Ley de la Termodinámica. La fusión de termodinámica y la economía dio origen a la termoeconomía, pero ha sido específicamente sobre la exergoeconomía donde se han hecho la mayor parte de los aportes metodológicos de la termoeconomía. El término exergoeconomía, proviene de la fusión entre la exergía y la economía, con lo que se busca estimar, a partir del análisis exergético las VIT y los costos asociados a estas.

Por otra parte, a medida que los conceptos derivados de la termodinámica avanzan, se generan modelos energéticos más complejos que conllevan a desarrollar nuevas metodologías de análisis, evaluación y optimización de sistemas energéticos (Abido, 2006; Abido, 2009; Cziesla y Tsatsaronis, 2002). Los primeros métodos de optimización de sistemas energéticos se fundamentaron en el ensayo y error, luego se plantearon los multiplicadores de L'agrange (Flores, 2004) y finalmente se ha recurrido a los algoritmos evolutivos (Sahoo, 2007; Padilha et al., 2009).

A medida que los métodos de optimización avanzan, los modelos establecidos para el análisis de sistemas energéticos se hacen más complejos, debido a que las herramientas se hacen propicias para enfrentar problemas que no son posibles de solucionar con metodologías convencionales. Una forma de aprovechar los métodos no convencionales, como los algoritmos evolutivos, los cuales a pesar de presentar en la literatura algunos avances en este sentido (Sahoo, 2007; Koch et al., 2007), no se ha utilizado todo el potencial que tienen para optimizar sistemas energéticos, esencialmente porque la estructura de los modelos energéticos utilizados para la optimización presentan contenidos similares. Es común encontrar trabajos que optimizan sistemas energéticos con múltiples objetivos e incluyendo el componente ambiental (Pelet et al., 2005), pero el enfoque se hace internamente en el sistema; el entorno, a pesar que es una parte esencial del sistema porque interactúa con este, solo es incluido como una referencia y por lo tanto limita el problema al no relacionar las variables del entorno. Este trabajo está dedicado a incluir el entorno en el análisis con algunas de las implicaciones que este demanda, lo que hace evaluar el sistema energético desde un punto de vista contrario al que convencionalmente se ha venido haciendo. El incluir el entorno en la evaluación del sistema energético, indudablemente hace el modelo complejo porque esto implica considerar aspectos inciertos y asumir que el sistema no es aislado termodinámicamente. De cualquier manera, ya sea para estudiar un sistema energético debido a sus partes internas o considerando el papel

del entorno, es necesario emplear los conceptos derivados de la termodinámica y la economía.

1.1. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA TERMODINÁMICA

La termodinámica clásica hace referencia a la macro estructura de la materia porque involucra características de una gran porción de materia y no del desempeño de moléculas individuales (Bejan et al., 1996). No obstante, el análisis termodinámico involucra cualquier sistema que reúna las siguientes condiciones:

- Que el sistema sea especificado con superficies totalmente definidas y delimitadas claramente de su entorno, el contorno del sistema es conocido como superficie de control o fronteras del sistema, las cuales pueden ser fijas o móviles.
- Que el sistema sea cerrado, es decir, cuando la masa estudiada dentro del sistema sea fija; o que el sistema sea abierto, es decir, cuando haya flujos másicos que entren y/o salgan del sistema. Cuando hay flujos másicos que atraviesan la superficie de control, el sistema es llamado volumen de control.
- Que se identifiquen los análisis requeridos según las características del sistema y las necesidades del evaluador. De esta manera es posible identificar los balances adecuados, ya sean de primera y/o segunda ley y la necesidad de incluir o no el factor económico.

De cualquier manera y entendiendo las condiciones de los sistemas, el análisis termodinámico involucra a la Primera y Segunda Ley de la termodinámica y más recientemente los análisis Termoeconómicos. A continuación hacemos una breve descripción de cada uno de esos conceptos.

La primera ley, también conocida como principio de conservación de la energía, establece que si se realiza trabajo sobre un sistema o bien éste intercambia calor con otro, la energía interna del sistema cambiará. Visto de otra forma, esta ley permite definir el calor como la energía necesaria que debe intercambiar el sistema para compensar las diferencias entre trabajo y energía interna. Fue propuesta por *Nicolás Leonard Sadi Carnot* en 1824, en su obra *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*, en la que expuso los dos primeros principios de la termodinámica. La Primera Ley de la termodinámica, se puede expresar de forma general con la Ec. (1.1), para sistemas abiertos, donde Q es el calor necesario para que se genere W que es el trabajo mecánico útil; m es la masa, h la entalpía específica, ϑ la velocidad, g es la gravedad, z es la altura con respecto a una referencia y ΔE_{sis} es el cambio de energía de un estado a otro.

$$Q - W + \sum_e m_e \left(h + \frac{1}{2} \vartheta^2 + gz \right)_e - \sum_s m_s \left(h + \frac{1}{2} \vartheta^2 + gz \right)_s = \Delta E_{sis} \quad (1.1)$$

Para sistemas cerrados los términos de entrada y salida se eliminan, quedando la expresión de conservación de energía reducida a

$$\Delta U = Q - W \quad (1.2)$$

Donde, ΔU es el cambio de energía interna del sistema. En los sistemas abiertos se presentan cambios generales de energía (E), mientras que en los sistemas cerrados solo se tiene en cuenta los cambios de la energía interna (U).

La segunda ley de la termodinámica, en un sentido general afirma que las condiciones entre un sistema y sus alrededores tienden a igualarse. Las condiciones de presión, densidad y, particularmente, las de temperatura tienden a igualarse. Esto significa que un sistema aislado llegará a alcanzar una temperatura uniforme. Una máquina térmica es aquella que provee trabajo eficaz gracias la diferencia de temperaturas de dos cuerpos. Dado que cualquier máquina termodinámica requiere una diferencia de temperatura, se deriva pues que ningún trabajo útil puede extraerse de un sistema aislado en equilibrio térmico, esto es, requerirá de la alimentación de energía del exterior. La segunda ley se usa a menudo como la razón por la cual no se puede crear una máquina de movimiento perpetuo. La segunda ley de la termodinámica ha sido expresada de muchas maneras diferentes. Sucintamente, se puede expresar así:

- Es imposible un proceso cuyo único resultado sea la transferencia de energía en forma de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura. Enunciado de Clausius.
- Es imposible todo proceso cíclico cuyo único resultado sea la absorción de energía en forma de calor procedente de un foco térmico (o reservorio o depósito térmico), y la conversión de toda ésta energía en forma de calor en energía en forma de trabajo. Enunciado de Kelvin-Planck.
- En un sistema aislado, ningún proceso puede ocurrir si a él se asocia una disminución de la entropía total del sistema.

El enunciado de la segunda Ley para sistemas abiertos, en los que hay transferencia de masa, se maneja el concepto de exergía de flujo, que no es más que la exergía asociada a una corriente material que atraviesa un volumen de control determinado. Adaptando la expresión y utilizando magnitudes específicas (por unidad de masa) se tiene:

$$e = (h - h_o) - T_o(s - s_o) + \frac{1}{2}v^2 + gz \quad (1.3)$$

En la Ec. (1.3) y en las referidas a la exergía, el subíndice o se refiere a las condiciones o estado de referencia, el cual puede ser las condiciones estándar del medio ambiente. Por otra parte, T es la temperatura y s es la entropía específica. El balance de exergía en un sistema abierto queda así:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{VC} - P_o \frac{dV_{VC}}{dt}\right) + \sum_e \dot{m}_e e_e - \sum_s \dot{m}_s e_s - \dot{I}r_{VC} \quad (1.4)$$

Donde $\dot{I}r$ son los flujos de irreversibilidades del volumen de control (VC). Un sistema cerrado puede interactuar con el entorno mediante transferencias de

energía en forma de calor o trabajo, que implican una transferencia de exergía entre el sistema y el entorno. Esta exergía transferida no coincide necesariamente con la variación de exergía del sistema, ya que la exergía también se destruye como consecuencia de la generación de entropía (todos los procesos reales con transferencia de energía en forma de calor conllevan, además de una transferencia de entropía, una generación de entropía debida a procesos irreversibles dentro del sistema), tal como se describe en la Ec. (1.5).

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 \left(1 - T_o/T_f \right) \delta Q - [W - P_o(V_2 - V_1)] - T_o\sigma \quad (1.5)$$

La variación de exergía del sistema cerrado es igual a la transferencia de exergía con el entorno, menos la destrucción de exergía $T_o\sigma$, donde P es la presión, V el volumen σ representa la generación de entropía, este último por el segundo principio, no puede ser negativa. A continuación se analiza el concepto de exergía con más profundidad, debido a que en adelante sobre este concepto se carga la mayor parte del trabajo.

1.1.1 El concepto de exergía

El concepto de exergía está indisolublemente asociado al de desequilibrio entre un cierto sistema y su entorno, determinado por la diferencia entre los valores de alguna variable dinámica que los caracteriza (por ejemplo la temperatura o la presión). El desequilibrio consiste en que el valor de la variable dinámica en cuestión es diferente para el sistema y su entorno y, por ello, ambos están en una situación de desequilibrio. Generalmente habrá alguna barrera que impida el alcance del equilibrio en la variable dinámica, por lo que la situación se mantiene así; pero si espontáneamente o por la acción de un agente externo la barrera se quita, entonces el sistema y su entorno desembocan en un movimiento hacia el equilibrio. En estas circunstancias, dicho movimiento puede aprovecharse para lograr algún efecto útil, como trabajo mecánico. La exergía es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener de un desequilibrio entre un sistema y su entorno. La exergía es pues una cantidad física que depende de las variables de dos sistemas, y no nada más de uno sólo; tiene por ello una propiedad singular, pues de los hechos de que vale cero cuando ambos sistemas están en equilibrio y de que es diferente de cero cuando están en desequilibrio, se sigue que la exergía es la capacidad almacenada de realización de trabajo por dos sistemas en desequilibrio.

Hay exergía acumulada en el mar tropical (por el contraste de temperatura entre la superficie y el fondo), en una masa de agua situada por encima del nivel del mar en una presa (por el contraste de alturas), en una masa de vapor de agua en el subsuelo, como en la geotermia (por la diferencia de temperatura y presión con el aire de la atmósfera), en un cuerpo en rotación (por el contraste en velocidad de giro con respecto a los cuerpos en reposo), en una masa de petróleo o carbón (por la diferencia en composición química con la atmósfera), etc.

Del mar tropical, así como de la masa de vapor geotérmico, puede obtenerse trabajo mecánico interponiendo un motor térmico entre ambos sistemas y la atmósfera. En un paso siguiente, el trabajo mecánico así obtenido, puede convertirse en electricidad, como en las plantas de gradiente térmico marino de Hawai o en las geotermo-eléctricas mexicanas de Cerro Prieto, en Baja California o en Los Azufres michoacanos. Los gradientes térmicos marinos y geotérmicos son pura exergía térmica almacenada tanto por la actividad diaria solar como por la evolución de nuestro planeta. Por su enorme magnitud, a ambos recursos se les puede considerar como prácticamente inagotables. Ahora bien, una vez que las temperaturas del mar en la superficie y en el fondo se igualan, o que el vapor geotérmico ha escapado integrándose al aire de la atmósfera, ya no habrá desequilibrio con el entorno y en ambos casos la exergía almacenada habrá desaparecido.

Algo semejante sucede con la masa de agua de la presa y el cuerpo en rotación: de ambos se puede obtener trabajo mecánico. Si entre la masa de agua y el mar interponemos una turbina, se puede generar electricidad o accionar un molino de agua para granos; si acoplamos el cuerpo en rotación con un generador, también se obtiene una corriente, que puede cargar una pila eléctrica, utilizable después en la realización de un trabajo. De hecho, en varios diseños de autos se aprovecha el frenado para poner a girar un cuerpo interior y almacenar exergía mecánica; esta exergía es reutilizada en el momento del arranque del vehículo, ahorrando exergía de la gasolina. Se consigue de este modo un auto más eficiente y más barato. Cuando la masa de agua baja al nivel del mar o cuando el cuerpo detiene su rotación, el desequilibrio y la exergía almacenadas se van a cero, y ya no hay posibilidad de realizar un trabajo.

La exergía química es la capacidad de trabajo almacenada entre un sistema y el entorno en virtud de una diferencia en composición química, como la que hay entre una masa de petróleo o carbón y la atmósfera. Cuando el carbón y el petróleo se queman en una termoeléctrica se generan trabajo y electricidad por lo que se puede uno dar cuenta que cuentan con exergía.

Si en el proceso de alcance del equilibrio de un sistema se utiliza un dispositivo que funciona con fricción y disipación, entonces no se convierte en trabajo toda la exergía disponible, sino solamente una parte; el resto se desperdicia, y se consigna como dispendio de recursos. Pero si los dispositivos operan sin fricción y disipación, es decir, reversiblemente, entonces del desequilibrio se puede obtener el trabajo máximo o toda la exergía presente en el sistema y su entorno.

1.1.2 Eficiencia exergética y energética

La importancia de la exergía para valorar el desperdicio de recursos exergéticos y, por tanto, la capacidad de ahorro, proviene de los siguientes hechos: a) toda sociedad requiere de la realización de tareas mecánicas y termodinámicas para su sobrevivencia (subir pesos, calentar espacios, girar cuerpos, etc.); b) cumplir una tarea termodinámica implica la creación de exergía (de un solo tipo, si es una tarea

simple) es decir, la formación de un contraste entre un sistema y su entorno (por ejemplo cuando se sube agua de un nivel a otro, como en el bombeo de agua en la agricultura, en la industria o en los hogares, o cuando se eleva la temperatura de un cuarto sobre la del ambiente, en la calefacción de interiores); c) la creación de exergía se realiza destruyendo la exergía existente en otras partes, como cuando la elevación de agua se lleva a efecto mediante un motor eléctrico, que funciona por la quema de la exergía química del combustible en la termoeléctrica; d) de las posibles maneras de cumplir una tarea mecánica o termodinámica, habrá una que implique el gasto mínimo de exergía; este gasto mínimo de exergía corresponde precisamente a la cantidad de exergía que se crea por la realización de la tarea (por ejemplo, la exergía mínima requerida para elevar una masa de agua a cierta altura es exactamente la exergía que se destruye por un dispositivo sin fricción que opera mediante la bajada de la misma cantidad de agua de tal altura; e) la diferencia entre la exergía mínima requerida y la consumida da una medida cuantitativa del desperdicio del recurso del cual se obtuvo ésta última y, al mismo tiempo, permite calcular con precisión el potencial de su ahorro. Una manera alterna de medir la utilización adecuada de los recursos exergéticos es mediante la llamada eficiencia exergética, la que se define como el cociente de la exergía mínima y la exergía consumida en la tarea; el valor máximo de la eficiencia exergética es de uno. La eficiencia exergética, o eficiencia de tarea, es distinta de la eficiencia tradicional de los dispositivos mecánicos o termodinámicos, también llamada eficiencia energética. Ésta se calcula por el cociente de la energía de salida o útil, y la energía de entrada al dispositivo (por ejemplo, en una planta termoeléctrica o de potencia, la eficiencia es normalmente el cociente de la energía eléctrica y el calor generado en la caldera).

$$\varepsilon = E_{min}/E_{TOT} \quad (1.6)$$

1.1.3 Las relaciones de exergía¹

La exergía es un concepto de mucha utilidad para el análisis termodinámico de sistemas energéticos en cuanto a las relaciones de flujo de calor y trabajo, la finalidad de uso y la eficiencia exergética del sistema y la relación económica de las corrientes de exergía y los equipos utilizados.

1.1.3.1 Relaciones de flujo de calor y de flujo de trabajo

A la utilidad termodinámica, se denomina *energía disponible* o *exergía*. Obviamente la exergía es tanto mayor cuando más alejados del entorno estén los potenciales intensivos del sistema. La exergía total de un flujo de materia es la suma de las componentes física, química, cinética y potencial. Las exergías

¹ TORRES C., VALERO A., Curso de doctorado en Termoeconomía, Universidad de Zaragoza, Depto. Ingeniería Mecánica. 2000. p.2 cp0172-modelo valero.pdf

cinética y potencial son totalmente convertibles en trabajo y por tanto coinciden con su energía. Para un volumen de control abierto, la componente física y química de la exergía de un flujo de materia se calcula como:

$$E_f = (H - H_o) - T_o(S - S_o) - \sum \mu_i(N_i - N_{i,o}) \quad (1.7)$$

donde H y S representan respectivamente, la entalpía y entropía. N_i representa el número de moles de componente químico del flujo y μ_i su potencial químico. El subíndice $-o-$ representa el valor de esas magnitudes en las condiciones del estado de referencia.

La exergía de un flujo de calor $-Q-$ cedido a un sistema a una temperatura $-T-$, viene dado por:

$$E_Q = Q \left(1 - T/T_o\right) \quad (1.8)$$

Y la exergía de un flujo de trabajo, coincide con su energía:

$$E_W = W \quad (1.9)$$

Como ya se ha indicado, es muy importante definir adecuadamente las condiciones que caracterizan al ambiente de referencia.

1.1.3.2 Relaciones de propósito y eficiencia

No se hace nada si se dispone de capacidad de acción pero no se coloca en juego para realizar aquello que deseamos. Las fuerzas de la Naturaleza disipan continuamente energía utilizable. El Sol cede enormes cantidades de energía que la Tierra absorbe en una mínima parte y se convierte en luz, calor, vapor de agua, sustancias químicas, movimiento de masas y vida. Sólo el hombre diseña, conscientemente, ingenios que son capaces de canalizar esa energía útil en los productos que desea.

La diferencia entre el poder de la naturaleza y el del hombre está en el *propósito*. La naturaleza no es propositiva, tiende a anular diferencias de potencial allí donde existen. El hombre en cambio, se aprovecha de esas fuerzas de la naturaleza para conseguir aquello que desea. Para formular una teoría que explique tanto a los procesos naturales como a los humanos, es necesario incluir el concepto de propósito en las ecuaciones. El Segundo Principio establece que la exergía saliente en un sistema que realice un proceso siempre será menor que la entrante, hay una cantidad de esa exergía que necesariamente no se utiliza en el proceso:

$$(Exergía\ entrante) - (Exergía\ saliente) = Irreversibilidad > 0 \quad (1.10)$$

No existe ninguna máquina perfecta, y el concepto de *eficiencia* es el que mide su grado de perfección. Este concepto es más antiguo que la Termodinámica y se define, como es bien conocido, como:

$$(1.11)$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Unidades de producto obtenido } (P)}{\text{Recursos utilizados para obtenerlo } (F)}$$

Esta definición es fundamental para la Termoeconomía, veamos por qué.

Una primera cuestión a la vista de la fórmula es preguntarse acerca de las unidades con las que se mide F y P . Si son las mismas unidades se obtendrá un valor adimensional, lo cual es bueno para comparaciones. Además si tanto P como F son flujos físicos, éstos pueden medirse con la exergía, así aseguraremos su universalidad –para procesos energéticos– y sobre todo permite medir objetivamente la pérdida de calidad del proceso. Existen procesos en los que no se pierde cantidad de energía, pero se tiene la certeza de que siempre se pierde calidad. Esto puede expresarse como:

$$\text{Recursos } (F) - \text{Producto } (P) = \text{Irreversibilidad } (I) > 0. \quad (1.12)$$

La irreversibilidad generada por el proceso está relacionada con el concepto de entropía generada, definido por la Ley de Gouy-Stodola:

$$I = T_o S_g \quad (1.13)$$

Siendo T_o la temperatura del ambiente de referencia.

La Ecuación (1.12) rige para todos los procesos diseñados por el hombre, mientras que la Ec. (1.10) rige para todos los procesos, sean naturales o artificiales. En consecuencia, una segunda cuestión es precisamente cual es la diferencia entre ambas ecuaciones. Pues bien, ésta radica en que el hombre define P como aquello que quiere producir. El propósito está contenido en la Ec. (1.12) pero no en la Ec. (1.10). Esta es una diferencia fundamental. La eficiencia solo puede definirse en sistemas propositivos, la Ec. (1.10) incluye información que no tiene el Segundo Principio y esa información responde a quien es el producto; por diferencia también responde a cuáles son los recursos, y con ambos, la definición de *eficiencia* queda determinada en un valor comprendido entre cero y uno para los sistemas productivos.

Sin embargo, tener recursos con elevada exergía no es suficiente, se requieren máquinas eficientes que las conviertan en los propósitos deseados.

1.1.3.3 Eficiencia y costo exergético²

Se sabe que el primer Principio solo discierne como pérdidas, la materia y energía que atraviesa los límites del proceso. Una fricción sin pérdida de energía, una disminución espontánea de temperatura o un proceso de mezcla no son diagnosticados como pérdidas. Para descubrir las pérdidas de calidad de la energía

² TORRES C., VALERO A., Curso de doctorado en Termoeconomía, Universidad de Zaragoza, Depto. Ingeniería Mecánica. 2000. p.3 cp0172-modelo valero.pdf

es necesario usar el segundo Principio, y la combinación de ambos permitirá cuantificar y localizar las pérdidas de un proceso. Por ejemplo, en el caso de una central térmica, en la caldera se obtiene una energía de más baja calidad que la del combustible utilizado, que será disipado en parte en el condensador. Aunque las pérdidas aparecen en el condensador, gracias al segundo Principio sabemos que su origen está en la caldera. Es lícito afirmar entonces que el uso combinado de ambos Principios puede hacerse a través de la exergía, que mide la distancia termodinámica entre un producto y su entorno.

De manera desafortunada, el análisis exergético es una condición necesaria pero no suficiente para determinar las causas del origen de las pérdidas. Por ejemplo, un mal funcionamiento de la combustión en la caldera, lleva consigo un exceso de aire que produce un aumento del volumen de los gases que deben ser evacuados por el sistema de ventiladores de tiro inducido, lo que requiere un consumo adicional de energía eléctrica en este equipo. Es evidente que un aumento en las pérdidas de los ventiladores no debería ser imputado como producto del mal funcionamiento de éstos, sino de la caldera. El costo de producción no tiene por qué originarse donde aparecen las irreversibilidades. Aunque el balance de exergía permite localizar las pérdidas, es necesario un profundo análisis adicional del proceso, cuando se pretenda cuantificar e identificar el origen de las pérdidas en el proceso de producción.

Un primer paso, en la tarea de determinar los posibles ahorros de energía en un proceso, será estudiar donde aparecen todas y cada una de las irreversibilidades y relacionarlas con el efecto que tienen en el consumo de recursos. En resumen, lo importante no es la exergía, E , que puede contener un producto funcional, si no su costo, que se denota por E^* , y que es igual a su exergía más las irreversibilidades acumuladas a lo largo del proceso para obtener el producto:

$$E^* = E + \sum \text{Irreversibilidades del proceso} \quad (1.14)$$

Dado que E^* es una magnitud expresada en términos de exergía se designa como el *coste exergético* de un producto funcional, y que equivale a la cantidad de exergía necesaria para obtenerlo. Investigar cuáles irreversibilidades constituye el origen del coste de un producto, no es tan simple como realizar balances de exergía, requiere además un análisis profundo del proceso que se ha dado en llamar *proceso de formación de los costes*. Su estudio es un paso adicional al análisis exergético convencional que llamaremos *contabilidad de costes exergéticos* y que es la base del análisis termoeconómico.

El coste de producir algo, en un sentido general, es la cantidad de recursos necesarios para obtenerlo. Según esto la eficiencia y el coste tienen la misma base conceptual. La eficiencia suele expresarse libremente en una gran variedad de unidades. Tanto el producto como los recursos empleados se miden en las unidades convenientes en cada proceso. Por el contrario el coste tiende a expresarse en unidades monetarias. Pero es posible aproximar ambos conceptos suficientemente. En efecto, si se analizan en un proceso simple y se miden los recursos y el producto en términos de exergía, la eficiencia exergética, ϵ , es la

inversa del consumo exergético de recursos, κ , y esto es justamente su coste exergético, que se denota por κ^* .

$$1/\varepsilon = F(\text{unidades de energía})/P(\text{unidades de energía}) = \kappa^* \quad (1.15)$$

A pesar de todo, todos los procesos están encadenados, el recurso que se utiliza en un proceso, ha sido producto de algún otro proceso que ha consumido recursos que son productos de productos anteriores. Una vez definidos los límites de un proceso y sus componentes, y cada uno de éstos con una función predefinida que define su objetivo de producción, los recursos empleados y por tanto su eficiencia, es posible definir el coste exergético de un flujo en el proceso como la cantidad de recursos exergéticos que entran al sistema, necesarios para producir dicho flujo.

1.2 ESTADO DEL ARTE

La termodinámica, una ciencia que empezó hace 200 años (Bejan, 1996); con el análisis y evolución de máquinas térmicas se ha encaminado en mejorar la eficiencia de estos sistemas a partir de las leyes físicas, cuyo fundamento conduce a desarrollar tecnologías energéticas más óptimas. Se puede pensar que la optimización en los SGE, solo es posible con los conceptos que provienen de la termodinámica y la economía, pero el análisis multiobjetivo, ha permitido abordar temas de diferentes disciplinas, con coherencia y rigor en la obtención de los resultados (Garduno-Ramirez, 2001; Li et al, 2000). A pesar que el análisis multiobjetivo carece de las herramientas para describir el funcionamiento interno de un sistema energético, lo cual es propio de la termoeconomía; si tiene la posibilidad de evaluar sus condiciones óptimas de maniobrabilidad en un ambiente externo probable. Por lo tanto, esta propuesta busca analizar un sistema de generación de energía a partir de dos criterios de desarrollo diferente, pero que en conjunto lograrían mejorar parámetros de funcionamiento del sistema global. Por un lado la termoeconomía, que es la fusión de la termodinámica y la economía, ha sido una forma de analizar eficiencias en términos de costos y energía en un sistema de generación; por otra parte, el análisis multiobjetivo, a pesar de abordar el problema desde una perspectiva más general, es una herramienta metodológica que permite obtener un conjunto de estados óptimos del sistema global, a partir de combinaciones dadas entre el sistema y los factores externos. Por ello y, como una consecuencia de realizar este trabajo con base en estos dos principios, se muestra como ha sido el desarrollo de cada uno de los conceptos señalados anteriormente.

1.2.1. Desarrollo de la Optimización Termoeconómica

Para tener una apreciación clara del desarrollo de la termoeconomía, es preciso mencionar que esta nace de la termodinámica, por lo tanto, inicialmente se hace un recorrido por la evolución de esta disciplina. La termodinámica, es una ciencia que lleva aportando importantes desarrollos en el uso de la energía, desde el siglo XIX se han desarrollado modelos de optimización originarios de la termodinámica tradicional, en los que se puede destacar el desarrollo de una herramienta para optimización dinámica (Li et al., 2000), la evaluación de los parámetros de diseño

en la optimización termodinámica en plantas de generación (El-Sayed, 2003), la optimización en sistemas energéticos considerando los efectos ambientales (Frangopoulos, 2002) e incluso, desarrollos de modelos 3D para encontrar rutas de generación de entropía locales (Sciubba, 2005); todos estos trabajos delimitan el desarrollo de la termodinámica clásica, de tal manera que no muestran evidencias sobre la inclusión de áreas de la ciencia de naturaleza heurística (Bejan et al., 1996; Biegler, 2000; Worrell et al., 2001).

El término compuesto Termoeconomía, propuesto por Evans y Tribus en 1962, tiene como propósito esencial estudiar la relación inherente entre la termodinámica y la economía, mencionar las bases teóricas de una nueva disciplina de ahorro energético y obtener modelos que permitan recoger criterios generales para evaluar la eficiencia y el costo de sus productos, en sistemas con un consumo intensivo de energía (Aranda y Scarpellini, 2004). A partir de ese momento empezó el desarrollo de la optimización termoeconómica (Bejan et al., 1996; Lozano y Valero, 1993; Lindenberger, 2002), como una teoría reconocida.

La teoría termoeconómica, propició la presentación de nuevos trabajos y se desarrollaron diferentes aplicaciones a partir de esta. Los principales avances en el desarrollo de la termoeconomía fue la aplicación realizada a la planta térmica de Teruel (España) cuyos resultados se presentaron en el Simposio Mundial de Energía (Lozano et al., 1994); posteriormente se desarrolló un procedimiento en el cual aplicaban un método de optimización local, basado en la minimización de los costos termoeconómicos de los productos de cada corriente de un sistema energético; una vez se comprobara que la teoría termoeconómica permitiera resultados razonables, empezó a aplicarse en diferentes tipos de tecnologías de generación energética; inicialmente la aplicación de la teoría termoeconómica para un diagnóstico a una planta de generación cuya caldera era de Combustión en Lecho Fluidizado a presión y después se presentaron dos trabajos, el primero es un estudio exergético en dos puntos críticos en una industria productora de pescado (Rojas, 2005) y el segundo fue una comparación energética de dos plantas de generación de características similares, empleando diferentes tecnologías; ambos trabajos aplicaron la teoría termoeconómica (Bastidas, 2005). La teoría termoeconómica propuesta por Valero inicialmente fue cuestionada por la propuesta de reglas de asignación carentes de bases teóricas contundentes; se hicieron algunos trabajos de diagnóstico para comprobar algunos apartes específicos (Torres y Valero, 2001) y la adopción de nuevas reglas de asignación (Chejne y Restrepo, 2003). La aprobación y unificación de la teoría termoeconómica se refleja en un compendio de trabajos a los cuales se aplica la teoría termoeconómica, en la revista del Centro Internacional de Aplicaciones Termodinámicas. También se pueden apreciar en la literatura muchos trabajos de evaluación termoeconómica con metodología no convencional (Ahadi et al., 2006; Bastianoni et al., 2007; Bernal y Lopez, 2009;)

1.2.2. Desarrollo de la Optimización Multiobjetivo

La necesidad de tomar decisiones frente a una situación particular, afectada por diferentes objetivos de manera simultánea, motivó el desarrollo del análisis

multiobjetivo. Inicialmente los esfuerzos estuvieron dirigidos en incluir esos objetivos en el análisis económico, pero las características de algunos objetivos no permitían ser evaluados en términos económicos, por lo que se hace necesario usar herramientas que permitan incluir múltiples objetivos en forma simultánea de manera explícita en el proceso de toma de decisiones (Smith et al, 2000). El análisis multiobjetivo, por ende, más que un modelo de optimización es de toma de decisiones, pero con base en la optimización de una función objetivo dentro de un proceso de múltiples funciones estocásticas o determinísticas que actúan simultáneamente.

En 1975 Cohon y Marks desarrollaron una clasificación del método por análisis multiobjetivo, en la que se considera los métodos de acuerdo con la forma en que ellos involucran la estructura de preferencias del decisor en el proceso de toma de decisiones; luego se hace una clasificación de los métodos de acuerdo con sus características más predominantes; es decir, métodos de programación matemática, estocásticos, de múltiples decisores y otros métodos (Galván et al., 2003); en 1989 Duckstein clasifica los métodos de acuerdo con la filosofía del proceso de toma de decisiones, es decir, los métodos se clasifican teniendo en cuenta la formulación de la estructura básica de los algoritmos y la solución deseada por el decisor; también se muestra una combinación de las clasificaciones de Goicoechea y Duckstein (Smith et al, 2000); Garduno-Ramírez (2001), aplicaron el concepto de multiobjetivo a las variables de salida de un sistema de generación en los que incluían el consumo de combustible, el flujo de calor, las emisiones, etc.

Al considerar variables del entorno, el sistema no solo debe interactuar con nuevos factores, sino que estos pueden ser inciertos. La incertidumbre está asociada con la falta de cantidad o calidad de la información (Salazar, 2008) y es un concepto que ha ido cobrando fuerza en la última década, por la inclusión en el análisis de diversos problemas. Se han desarrollado trabajos que van desde modelos de optimización no lineal en la calidad de corrientes de agua bajo incertidumbre (Quin et al., 2007), evaluación bajo incertidumbre por simulación Montecarlo de ciclo de vida en la producción de electricidad a partir de la incineración material residual (Sonnemann, 2003), definición y cálculo de modelos ecológicos bajo incertidumbre (Turley y Ford, 2009), parámetros de incertidumbre para un pulso de propagación de ondas en un modelo de red de arterias humanas (Xiu y Sherwin, 2007), cambios tecnológicos e incertidumbre en ambientes económicos (Böhringer, 2009). Como se aprecia en este párrafo, la incertidumbre es un concepto que está incursionando poco a poco en diferentes entornos científicos y por lo tanto el análisis de sistemas energéticos vincula la incertidumbre a través de este trabajo.

1.3 ESTRUCTURA Y ALCANCE DE LA TESIS

En la medida que avanzan las herramientas y métodos aplicados para resolver modelos de optimización, los investigadores desarrollan planteamientos y problemas de sistemas energéticos más complejos que pueden ser solucionados con dichas herramientas. El modelo energético que habitualmente se utiliza como

ejemplo a resolver es el denominado CGAM, el cual no ha presentado modificaciones fundamentales en su estructura, sin embargo, los métodos utilizados para evaluarlo han sido diversos. Desde el punto de vista de la termoeconomía, un sistema energético se puede evaluar en dos aspectos fundamentales; el primero es referido al costo exergético de las corrientes que interconectan los componentes del sistema y el segundo a la optimización de las condiciones de operación de los componentes del sistema con la finalidad esencial de minimizar los costos del producto. Sin embargo, estos dos aspectos a evaluar en el sistema están relacionados fuertemente.

Este trabajo hace referencia a los aspectos mencionados anteriormente, pero inclinado fundamentalmente a la optimización de sistemas energéticos aplicando algoritmos evolutivos. El aporte principal de este trabajo es la inclusión en el modelo de optimización, variables físicas y económicas del entorno que dependen de las condiciones del escenario donde se referencia el sistema energético; en este sentido, las variables del entorno dejan de ser parámetros de referencia únicamente y pasan a ser variables de decisión en el modelo, por lo tanto la metodología de evaluación es de toma de decisiones multiobjetivo. Este aporte general, se alcanza a través de aportes menores que cuyo orden consecutivo es el siguiente: a) mejoramiento de los parámetros referenciados en la ecuación termoeconómica de optimización propuesta por Bejan et al. (1996) para mejorar la fiabilidad de los resultados, b) implementación de una matriz de exergías en el desarrollo del algoritmo evolutivo a partir de variables de decisión derivadas de las condiciones de operación de los equipos que integran el sistema, es decir, en vez de utilizar un modelo de decisión energético se utiliza uno exergético, c) comparación de dos sistemas energéticos durante la optimización con lo que se muestra las ventajas y desventajas de un sistema con respecto al otro, y d) la inclusión de la incertidumbre en el análisis debido a las variables provenientes del entorno. Estos aportes se han presentado en varios eventos científicos de carácter nacional e internacional, tanto en la temática energética como computacional, y publicado en revistas de alto impacto referenciadas por COLCIENCIAS con publindex A1. A continuación se presenta un listado de los eventos y revistas donde se presentaron apartes de este trabajo:

- XI Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Valoración de los Parámetros Exergoeconómicos de un Sistema Energético Aplicando Metodología Multiobjetivo. 15 al 17 de octubre, Cartagena. 2008,
- XV Congreso Colombiano de Química, “Química y Compromiso Social”. 29 al 31 de octubre, Bogotá. 2008.
- III Congreso Internacional sobre Uso Racional y Eficiente de la Energía – CIUREE. 13 al 15 de noviembre, Medellín. 2008.
- IX Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos – CAIP. Optimización de Sistemas Energéticos Aplicando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. Libro de resúmenes (ISBN: 976-956-319-926-0) y Actas del Congreso (ISBN: 978-956-319-925-3). Agosto, Montevideo. 2009.

- II Congreso Internacional de Materiales, Energía y Medio Ambiente. Optimización de un Sistema Energético Simple por Análisis Multiobjetivo. 11 al 14 de noviembre, Barranquilla. 2009.
- Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Análisis Multiobjetivo a un Sistema Energético. Vol. 51. pp. 51-58. 2010. Publindex Colciencias A1.
- Revista Información Tecnológica. Optimización Termoeconómica y Ambiental con Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. Fue aceptada para publicación en los próximos meses. Publindex Colciencias A1.

La tesis está constituida por este capítulo introductorio, donde se hace una breve descripción de los apartes teóricos que constituyen las bases fundamentales de la tesis y un recorrido cronológico de los principales aportes que han servido para llegar a la construcción de este trabajo; el capítulo dos hace referencia a la ecuación termoeconómica para optimización de sistemas energéticos replanteada a través de unos supuestos que buscan aumentar el espectro de soluciones minimizando el riesgo de obtener valores fuera del rango de operación de los equipos del sistema; el capítulo tres hace referencia a la aplicación de los algoritmos genéticos multiobjetivo para solucionar un problema de optimización en el que intervienen un sistema energético y algunas condiciones del entorno analizando el comportamiento de las variables internas del sistema con respecto a las variaciones que se presentan en el entorno; en el capítulo cuatro se aplican los conceptos del segundo capítulo a un sistema estudiado para un entorno específico colombiano; en el capítulo cinco se recogen todos los avances de los capítulos anteriores teniendo en cuenta la incertidumbre del entorno; finalmente se constituye un capítulo cinco donde se consignan las conclusiones de esta tesis.

CAPITULO 2.

NUEVOS PARAMETROS EXERGOECONÓMICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

INTRODUCCION

El estudio de los sistemas energéticos ha tenido, a través del tiempo, el reto de alcanzar mejores niveles de eficiencia y para ello se han provisto de variadas metodologías que se pueden clasificar en dos grandes ramas; por un lado las convencionales, que se fundamentan en los principios de primera y segunda ley, teniendo como objetivo principal el funcionamiento y disposición de los equipos en el sistema (Li et al., 2000; Worrell et al., 2005); por otra parte, están las metodologías no convencionales que incluyen, además de los criterios de primera y segunda ley, otros aspectos como la relación entre la termodinámica y la economía, resaltando el hecho que la transformación de la energía lleva implícita la formación de valor agregado al producto, en procura de compensar los efectos de las irreversibilidades en el sistema (Sahoo, 2007; Paulus y Tsatsaronis, 2006; Tsatsaronis, 2007). Este capítulo se contextualiza en el grupo no convencional, el cual a su vez también se puede dividir, desde el punto de vista de la optimización, en aquellos que buscan mejores valores a partir de la minimización del costo, con la inclusión de ecuaciones que se obtienen de los balances exergoeconómicos en cada equipo y de ecuaciones auxiliares que ayudan a completar un sistema de ecuaciones lineales empleando diferentes criterios (Lazzaretto y Tsatsaronis, 2002; Tsatsaronis et. al., 2007) y aquellos que generan una ecuación termoeconómica que relaciona la inversión de capital en función de la eficiencia exergetica y todos los costos relacionados de cada equipo, provista con parámetros constantes n , m y B (ver Ec. 2.1)(Tsatsaronis y Pisa, 1993; Bejan et al., 1996). Si se hace una comparación del avance entre las dos metodologías, la que emplea los balances exergoeconómicos con las ecuaciones auxiliares es la que más se referencia, aunque requiera de los modelos físicos y económicos por separado. La metodología de la ecuación termoeconómica no ha tenido mucho auge, y las constantes que hacen parte de la ecuación, no son fáciles de predecir; para obtenerlos se ha propuesto el método de los mínimos cuadrados y aún así los resultados no son confiables. En esta sección, se retoma la metodología de la ecuación termoeconómica, la cual tiene la ventaja de integrar en una sola ecuación los modelos físicos y económicos del sistema energético, y se hacen algunas transformaciones que incluyen factores externos, lo que permite hacer un análisis general de las constantes de la ecuación, dando claridad en la obtención de los resultados. El objetivo de este capítulo es por tanto, evaluar los parámetros de la ecuación de inversión en función de la eficiencia exergetica y el factor exergoeconómico, considerando variables externas del sistema que inciden en las corrientes de recurso, producto y residuo.

Existen métodos convencionales y complejos para la optimización de sistemas energéticos, tales como el método de los multiplicadores de *L'agrange* o metodologías de *ensayo y error*, que conllevan a altos costos computacionales pero con soluciones próximas a óptimos locales verdaderos. A medida que la formulación del problema energético es más compleja, las metodologías de solución convencionales son insuficientes para entregar respuestas óptimas globales, por lo que se han utilizado métodos heurísticos con implicaciones estadísticas como los algoritmos evolutivos y la lógica difusa; estos métodos generan óptimos globales aproximados pero los costos computacionales disminuyen. El CGAM es un modelo que resume la problemática de un sistema energético, el cual ha sido escogido para estudiar los métodos de optimización, el CGAM se representa a través de la Figura 2.1.



Para desarrollar los modelos de optimización global, es necesario definir el modelo termodinámico y económico del sistema energético que por lo general se asume en estado de aislamiento termoeconómico; es decir, que una componente del sistema puede ser optimizada por sí misma sin que la afecten las variaciones de otras variables del resto del sistema y que la solución óptima para dicho

componente reduzca el costo total del sistema. La condición de aislamiento termoeconómico se cumple, si el producto del componente y el costo unitario de sus recursos (productos internos y/o recursos externos) son constantes y cantidades conocidas. Esta apreciación de aislamiento termoeconómico de Torres y Valero (2001), puede ser extensiva a un sistema como ocurre parcialmente en los análisis de optimización en la gran mayoría de los casos referenciados en la literatura, en la que costos unitarios de los productos y recursos del sistema son constantes y en cantidades conocidas; sin embargo, estos mismos autores reconocen que la condición de aislamiento termoeconómico es una condición ideal, que no se puede satisfacer en la gran mayoría de casos reales. En el apéndice A se muestran los modelos termodinámicos y económicos para cada uno de los equipos que conforman el CGAM. En el apéndice B, se muestra los diferentes métodos convencionales de optimización utilizados en los sistemas energéticos.

2.2. EL ENTORNO DE UN SISTEMA ENERGÉTICO

Desde el punto de vista termodinámico, para evaluar un sistema hay que encerrarlo por líneas imaginarias que definen la frontera para diferenciarlo del entorno; esta apreciación conduce a tres conceptos claros en la evaluación termodinámica: el sistema, la frontera y los alrededores (ver Figura 1.1). La frontera, le permite al evaluador conocer cuales corrientes entran y salen del sistema, mientras que en el sistema se dan condiciones especiales para que las corrientes que entran a este, aumenten la calidad de la energía a través de un desequilibrio que posteriormente se traduce por lo general en trabajo como corriente de salida, cuando el sistema intenta configurar un nuevo equilibrio que tiende a las condiciones de referencia.

El pequeño marco conceptual, reseñado anteriormente no reviste ninguna novedad sobre el sistema y los cambios que se dan en este, porque hay leyes definidas y construidas a lo largo de la historia, que precisan las condiciones físicas del sistema energético (Lozano y Valero, 1993). No obstante, aún hay cuestionamientos sobre el papel que juega el entorno en la evaluación termodinámica. Puede decirse que el entorno representa un estado de referencia para la evaluación del sistema, debido a que este consta de parámetros termodinámicos sobre los cuales se hacen algunas consideraciones; la temperatura y la presión atmosférica del entorno pueden ser la referencia para establecer las irreversibilidades de cada una de las corrientes internas del sistema y establecer sus condiciones de equilibrio; adicionalmente, se considera que el sistema puede ejercer trabajo sobre el entorno y viceversa.

Si el entorno es referencia para evaluar termodinámicamente el sistema, entonces hay que detallar todos los aspectos que lo definen. La temperatura y la presión son parámetros suficientes para evaluar las irreversibilidades o la inferencia de calor y trabajo generados por el sistema, pero se excluyen otros aspectos que merecen igual importancia a la hora de hacer la evaluación. Un sistema energético se puede evaluar en un ambiente de referencia termodinámico, pero al momento de ponerlo en marcha, otras condiciones de los alrededores son importantes. Por un lado, no

es lo mismo poner en funcionamiento un sistema energético en una región de favorabilidad en la disposición de recursos energéticos y una poca demanda insatisfecha que en otra de escasos recursos energéticos y una gran demanda insatisfecha; por otra parte las diferencias se acentúan si las condiciones termodinámicas de referencia (presión y temperatura) son diferentes entre una región y otra, sin embargo, este último aspecto se puede resolver normalizando estas características a través de un análisis teórico. Ahora, ¿cómo se normalizarían aspectos como el costo económico, la disponibilidad, la oferta, la demanda, la calidad, etc., para la evaluación en cada una de las regiones en cuestión? Los aspectos señalados anteriormente, hacen parte del entorno y se deben plantear en el momento de hacer la evaluación del sistema. Hoy en día la evaluación del sistema es totalmente independiente de la evaluación del entorno donde el sistema funcionaría (aislamiento termoeconómico). Esta disparidad ha ocasionado algunos problemas en el funcionamiento integrado sistema – entorno, de los cuales se pueden citar algunos ejemplos: en Colombia el análisis para desarrollar estudios de generación energética debido a las condiciones dadas para el sistema es sencillo; como hay mucho recurso hídrico, se construyen hidroeléctricas. El hecho de no evaluar integralmente sistema- entorno contribuyó a la poca eficiencia para afrontar una caída en los embalses; solo se tuvo en cuenta la cantidad de energía producida y se dejaron de lado aspectos como límites de embalses en los periodos de sequía, costo de la energía en dichos periodos, demanda y oferta de la energía. Otro ejemplo claro se da en COOLESAR, empresa que cuenta con una caldera a base de carbón para sus procesos. Esta caldera fue diseñada para emplear carbón clasificado como antracita con un poder calorífico inferior de aproximadamente 28000 kJ/kg, carbón que se puede extraer de los yacimientos de La Loma- Cesar, región más próxima al sitio de la caldera. Sin embargo, la caldera no ha podido utilizar este carbón porque las empresas extractoras no le venden dado que lo producido tiene mercado internacional. Nuevamente se nota que la falta de la evaluación integrada sistema-alrededores hace que los proyectos energéticos tengan caídas de eficiencia (Gutiérrez, 2005).

2.3. MÉTODO DE OPTIMIZACION POR CAPITAL TOTAL DE INVERSION (TCI)

Los principales métodos solución para la optimización de sistemas energéticos señalados en la literatura, se pueden apreciar con claridad en el Apéndice B. En esta sección se muestra la optimización de un sistema energético a partir de la ecuación termoeconómica (Ec. 2.1) en función de las exergías de los componentes del sistema y algunos parámetros constantes, planteada por Tsatsaronis y Pisa (1993) y desarrollada por Bejan et al. (1996), la cual hace parte de una descripción general del modelo termoeconómico.

2.3.1. Descripción General del Modelo Termoeconómico.

La evaluación desde el punto de vista termoeconómico del sistema energético, requiere especial atención debido a que el análisis termodinámico generalmente aborda procesos cuasiestáticos, es decir, que las propiedades termodinámicas de las corrientes que conforman el proceso no tienen cambios significativos, pero en

el análisis económico, aunque para este caso esté demarcado sólo por el precio de los recursos del sistema (combustible, equipos, mantenimiento, etc.), estos precios no son cuasiestáticos ya que dependen de las condiciones del entorno, haciendo el proceso no aislado termoeconómicamente. En la fusión termodinámica – economía, al segundo concepto se condiciona a los requerimientos del primero, habiendo la necesidad de asumir las siguientes situaciones (Bejan et al, 1996):

1. El flujo de exergía del producto (\dot{E}_P) y el costo unitario del combustible (c_F), permanecen constantes (es un valor fijo) en el sistema a optimizar. En este caso el costo unitario del combustible tiene unidades de \$/kJ, lo que significa que existe un costo del combustible asociado a la cantidad de exergía aportada; si se mantiene la calidad del combustible en el periodo de evaluación del sistema energético se puede decir que la situación asumida es cierta (aislamiento termoeconómico); pero en la realidad un sistema energético puede emplear diferentes tipos de combustible entre biomasa, carbón, etc., a diferentes costos por unidad de exergía aportada. Por otra parte, para que se mantenga constante el flujo de exergía del producto, se requiere aportar un mismo flujo de exergía del combustible, así el flujo másico del combustible cambie, y por lo tanto, se hace definitivo un costo adicional para acondicionar el sistema a diferentes entradas de flujo másico para mantener constante el flujo de exergía del combustible, rompiendo la asunción de el aislamiento termoeconómico. En caso que no se pueda acondicionar diferentes flujos másicos en el sistema para mantener la exergía del recurso debida a la variedad de combustibles, el costo se paga con una disminución en la eficiencia, pero de igual manera se rompe el criterio de aislamiento termoeconómico debido a que el costo exergético unitario del recurso no es fijo.

2. Para cada componente del sistema, se espera que los costos de inversión se aumenten con el aumento de la capacidad y el incremento de la eficiencia exergética del componente. De aquí, se asume que para el componente k , el capital total de inversión (TCI_k) puede ser representado en un mínimo aproximado, por la siguiente relación:

$$TCI_k = B_k \left[\varepsilon_k / (1 - \varepsilon_k) \right]^{n_k} \dot{E}_{P,k}^{m_k} \quad (2.1)$$

Donde $\dot{E}_{P,k}$ es el flujo de exergía del producto para el componente k y ε_k es la eficiencia exergética del mismo componente. El término $[\varepsilon_k / (1 - \varepsilon_k)]^{n_k}$ expresa el efecto de la eficiencia (desempeño termodinámico), mientras que el término $\dot{E}_{P,k}^{m_k}$ expresa el efecto de la capacidad (tamaño del componente) sobre el valor del TCI_k . Los parámetros B_k , n_k y m_k dependen de las variables termodinámicas, tales como la presión y temperatura de las corrientes que entran y salen del sistema. En el caso que para el análisis se tengan en cuenta factores externos al componente k , tal como lo planteamos en esta tesis, entonces estos costos se deben asociar de alguna manera al costo total de inversión debido a los costos generados por los cambios en los factores del entorno. Una manera de relacionar los costos debido a los factores externos, es adicionándolos a la ecuación, tal como se muestra en la Ec. 2.2.

$$TCI_k = B_k \left[\varepsilon_k / (1 - \varepsilon_k) \right]^{n_k} \dot{E}_{P,k}^{m_k} + \sum_r C_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (2.2)$$

Donde C_{ik} son los costos asociados a los efectos externos en el equipo k y r son los tipos de costos externos que afectan el sistema. Estos costos dependen de las variaciones de los costos del recurso, el producto, el tamaño y la eficiencia; pero no permite incluir otras variables objeto de estudio como la disponibilidad, almacenamiento, calidad, con respecto al recurso; y la demanda, oferta y aplicaciones, con respecto al producto. Este problema se puede abordar desde el análisis multiobjetivo, proponiendo nuevas funciones objetivo, las cuales tendrían dimensiones diferentes a la económica, pero relacionadas entre sí.

3. Usualmente, una parte de los costos de operación y mantenimiento (O&M) dependen de los costos totales de inversión y otra parte del flujo de producción actual, asumiendo que los costos de operación y mantenimiento (Z_k^{OM}) anuales, atribuidos al componente k , pueden ser representados en un mínimo aproximado, por (Bejan et al., 1996):

$$Z_k^{OM} = \gamma_k(TCI_k) + \omega_k \tau \dot{E}_{P,k} + Y_k \quad (2.3)$$

En esta ecuación, γ_k es un coeficiente que corresponde al flujo de costos de operación y mantenimiento sobre el total de capital de inversión asociado con el componente k ; ω_k es una constante que corresponde al costos variable de operación y mantenimiento por unidad de tiempo asociado al componente k ; τ es el tiempo promedio anual de operación de la planta a carga nominal; y Y_k incluye todos los costos restantes de operación y mantenimiento que dependen de los costos totales de inversión y la exergía del producto (Bejan et al., 1996). En este caso cuando se consideran factores externos en el análisis, debe incluirse los costos de operación y mantenimiento generados por las actividades externas presentadas en el componente k o se asumen como parte de los costos restantes de operación y mantenimiento.

4. El análisis económico del sistema considerado, se simplifica al no incluir los efectos de financiación, inflación, impuestos, seguro y el tiempo de construcción; se tienen en cuenta los costos de arranque, capital de trabajo y los costos de licencia, investigación y desarrollo como parte del capital total de inversión. El capital invertido en equipos (Z_k^{CI}) asociado con el componente k , es obtenido por la multiplicación del costo total de inversión para su componente (TCI_k) por el factor de capital de recuperación β , con lo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_k^{CI} = \beta(TCI_k) \quad (2.4)$$

El costo total anual nivelado (Z), excluyendo el costo del combustible (recurso) asociado al componente k , se obtiene de combinar las ecuaciones 2.3 y 2.4.

$$Z_k = Z_k^{CI} + Z_k^{OM} = (\beta + \gamma_k)(TCI_k) + \omega_k \tau \dot{E}_{P,k} + Y_k \quad (2.5)$$

Si se divide la Ec. 2.5 por τ , se obtiene el flujo de costos \dot{Z}_k , el cual al combinarse con la Ec. 2.2; se tendría:

$$\dot{Z}_k = (\beta + \gamma_k)B_k/\tau \left[\left(\varepsilon_k / (1 - \varepsilon_k) \right)^{n_k} \dot{E}_{P,k}^{m_k} + \sum_r C_{ik} \right] + \omega_k \dot{E}_{P,k} + Y_k/\tau \quad (2.6)$$

De la teoría del costo exergético, se puede escribir la ecuación de función objetivo expresada como la minimización del costo exergético unitario del producto, para el componente k (Bejan et al, 1996):

$$Min_{c_{P,k}} = \frac{c_{F,k} \dot{E}_{F,k} + \dot{Z}_k}{\dot{E}_{P,k}} \quad (2.7)$$

Al combinar las Ecs. 2.6 y 2.7, y sabiendo que $\varepsilon_k = \dot{E}_{P,k} / \dot{E}_{F,k}$, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Min_{c_{P,k}} = \frac{c_{F,k}}{\varepsilon_k} + \frac{(\beta + \gamma_k)B_k}{\tau \dot{E}_{P,k}^{1-m_k}} \left[\left(\frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k} \right)^{n_k} + \sum_r C_{ik} \right] + \omega_k + \frac{Y_k}{\tau \dot{E}_{P,k}} \quad (2.8)$$

El costo de un flujo es una propiedad emergente, es decir, no existe como propiedad termodinámica de un flujo aislado, sino que debe ir asociado a un proceso de producción (Valero, 1998; Wischhusen y Schmitz, 2004) y, por lo tanto, la historia externa de una etapa precursora del proceso es importante para la evaluación de la subsiguiente, a pesar que las características generales del proceso se mantenga internamente. Esto se aprecia en la Ec. 2.8, en la que los parámetros β , γ_k , B_k , τ , ω_k y Y_k permanecen constante durante el proceso de optimización, y $c_{P,k}$ varía con la ε_k y la suma de los costos debido a los cambios del entorno del componente k . En este caso pensando en los objetivos de esta propuesta, se puede decir que la teoría del costo exergético, está basado en conceptos económicos que incluye la generación de costos de recursos y productos (Restrepo y Chejne, 2002; Chejne y Restrepo, 2003; Valero, 1998). Estos conceptos, reducidos forzosamente a condiciones cuasiestáticas, por el análisis termoeconómico; en realidad están sometidos a cambios constantes por la influencia de múltiples propiedades del medio. Por lo tanto, son variables que pueden ser estudiadas considerando posibles cambios del entorno, bajo condiciones de riesgo o incertidumbre, lo cual permitiría evaluar el desempeño del sistema global a través de la generación de costos, debido al cálculo de las irreversibilidades ocasionadas por los cambios de estado en las variables del entorno del sistema. Una manera de hacer el análisis de los costos generados por el entorno del sistema, sería empleando los criterios del análisis multiobjetivo, con lo que se podrían plantear sistemas energéticos, integralmente eficientes con el medio donde eventualmente se desenvuelvan. En el siguiente capítulo, se hace una descripción detallada del análisis multiobjetivo de un sistema energético no aislado termoeconómicamente.

2.3.2. Ventajas y Desventajas del modelo Termoeconómico

Retomando la Ec. 2.1, el capital total invertido (TCI) realizado para adquirir y poner en funcionamiento un componente (k), que genera una cantidad de exergía ($\dot{E}_{P,k}$), en función de su eficiencia exergética (ε_k); representa una ecuación que muestra tres constantes B , n y m ; las cuales se plantean como parámetros exergoeconómicos, dado que influyen en la evaluación termoeconómica del equipo dependiendo del desempeño del equipo. Algunos autores, han determinado los valores de las constantes, fijando uno de los parámetros y ajustando los restantes con el método de los mínimos cuadrados. Esta forma de determinar los valores de las constantes no es totalmente satisfactoria y los mismos autores reconocen que para ciertos rangos no cumplen con la ecuación planteada (Bejan et al., 1996; Tsatsaronis et al., 1993). Los parámetros mencionados dependen de las propiedades termodinámicas de las corrientes que afectan el equipo y las condiciones de fabricación en general (diseño y materiales); sin embargo, la información que se adquiere por estos criterios, la cual se obtiene de los fabricantes y de sistemas similares en operación, no es suficiente para determinar valores robustos para estos parámetros.

Otro parámetro involucrado en el análisis exergoeconómico considerado en este trabajo, es conocido como factor exergoeconómico (Bejan et. al., 1996; Valero, 1993; Mirandola y Stoppato, 2003), el cual muestra la relación entre los costos de no exergía, es decir aquellos costos relacionados únicamente con la inversión y los costos debidos a la exergía perdida y destruida, que corresponden al gasto de exergía por pérdidas globales traducido en costos económicos. Este factor se representa por la siguiente ecuación:

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k}(\dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k})} \quad (2.9)$$

Donde $\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}$, representa la suma de los costos de inversión y de los costos de operación y mantenimiento del equipo k ; el factor de la derecha del denominador de la ecuación, representa los costos debido a la destrucción y pérdida de exergía. El rango del factor exergoeconómico va entre cero y uno; cuando se obtienen valores cercanos a cero, se considera que el equipo requiere mantenimiento, dado que presenta valores altos de exergía destruida y perdida; cuando tiene valores cercanos a uno, se están presentando gastos exagerados para el funcionamiento, lo que sugiere un cambio de equipo (Lozano y Valero, 1993); esto no significa que los valores del factor deben ser 0.5, sino que es una referencia para establecer control sobre los equipos. Los parámetros de la Ec. 2.1 y la Ec. 2.9, están afectados por variables que no son exclusivas del comportamiento físico del equipo, también están influenciados por condiciones del entorno donde se desenvuelven debido a los cambios termoeconómicos. El entorno condiciona las corrientes de entrada y salida del equipo y el funcionamiento de éste, pero los efectos no se detectan fácilmente con la valoración termodinámica y económica, en función de la optimización del equipo

o sistema; es necesario incluir en el análisis, funciones del medio donde este despliega su potencial de transformación energética.

No obstante, para optimizar un sistema con la ecuación termoeconómica (capital total de inversión), la escogencia de los parámetros es primordial, por lo tanto es necesario evaluar estos parámetros para ajustar a valores aproximados las variables de decisión en la optimización. A continuación se muestran las ventajas y desventajas de utilizar la ecuación termoeconómica, frente a los modelos convencionales:

Ventajas:

- a. No se requiere información completa o detallada del sistema, debido a que sólo tiene como variables de decisión las eficiencias exergéticas de cada equipo para sistemas aislados termoeconómicamente, es decir se puede decidir sobre las eficiencias sin tener en cuenta la calidad del combustible. En caso que el sistema no sea aislado termoeconómicamente, se puede adicionar como variable de decisión la exergía producida debido a la posibilidad de cambiar el tamaño del sistema durante la optimización.
- b. Se puede tomar el sistema como un todo para optimizar, con lo que solo se tendría como variable de decisión la eficiencia exergética del sistema como un todo, simplificando la optimización. Cuando se expresa “ sistema como un todo”, quiere decir que se toma el sistema incluyendo todos los equipos que conforman el sistema; para este caso nos referiremos al sistema como el “sistema completo”
- c. Debido a que se pasa de tener dos modelos separados (físico y económico) a uno (termoeconómico), se reducen las variables de decisión, resultando más cómodo incluir nuevas variables en el modelo, sin aumentar el esfuerzo computacional.
- d. Permite evaluar el costo requerido que implica demarcar las tendencias tecnológicas.
- e. Permite evaluar la eficiencia óptima analíticamente del equipo o sistema para un costo mínimo de los mismos.

Desventajas:

- a. La determinación de los parámetros exergoeconómicos por mínimos cuadrados no es lo suficientemente confiable, sobre todo si la información disponible es escasa, como ocurre en la mayoría de los casos; esto significa que entre más información se tenga del sistema, hay mayor probabilidad de escoger estos parámetros adecuadamente.
- b. No permite obtener directamente los resultados de las variables de operación de cada equipo, es decir, una vez obtenido los valores de las exergías y eficiencias exergéticas de cada equipo, se debe traducir esta información a valores relacionados con las condiciones de operación del equipo (relación de presión del compresor, temperatura de los gases a la salida de la cámara de combustión, etc.).
- c. No reporta información precisa de los parámetros de operación del equipo o sistema.

El paso más importante de la optimización por la ecuación termoeconómica es estimar las constantes adecuadas para el mayor rango de eficiencia exergética posible y según los parámetros de operación de cada equipo del sistema. A continuación se muestra un fragmento de la tabla que contiene los valores de α según Bejan et al. (1996), el cual puede ser sustituido por m en la ecuación termoeconómica en la mayoría de los casos, incluyendo el estudiado en este trabajo.

Tabla 2.1. Valores típicos del exponente m de la ecuación termoeconómica para varios equipos térmicos

Equipo	Variable	Rango de tamaño	Exponente m
Caldera (industrial de carbón, gas o petróleo)	Cantidad de calor	5-350 MW	0.78
Caldera (carbón, gas o petróleo)	Cantidad de calor	50-2000 MW	0.85
Compresor (axial, centrífugo y reciprocante)	Potencia	0.05-8 MW	0.95
Compresor (rotatorio)	Potencia	0.05-1.2 MW	0.60
Torre de enfriamiento	Rata de agua de enfriamiento	0.05-9 m ³ /s	0.93
Bomba Motor Unidad de Turbina	Potencia	0.04-7.5 MW 0.15-7.5 MW	0.93 0.43
Evaporador	Área superficial	10-1000 m ²	0.54
Calentador de Agua	Cantidad de calor	0.01-15 MW	0.65
Turbina de gas	Potencia	70-200 MW	0.89
Intercambiador de calor	Área superficial		
Doble tubo		0.2-6 m ²	0.16
Placa plana		15-1500 m ²	0.40
Tubo y coraza		15-400 m ²	0.66
Bomba	Potencia	0.02-0.3 kW 0.3-20 kW	0.23 0.37
Bomba (turbina)	Potencia	0.5-300 kW	0.45
Reactor	Volumen	0.2-4 m ³	0.55
Transformador	Capacidad	0.2-50 MVA	0.39

Las variables escogidas para cada caso presentado en las Tablas 2.1 y 2.2, están relacionadas con la funcionalidad de cada equipo o sistema, de manera que si el equipo es una caldera, entonces la variable relacionada es la cantidad de calor producido; se hace el mismo razonamiento para el resto de los equipos y sistemas incluidos en dichas tablas. Los valores de m también se pueden establecer para plantas completas, lo que permite hacer análisis globales preliminares sin entrar en detalles de los recursos y productos en cada equipo de la planta. A continuación se relacionan algunos valores de α o m para el caso de la ecuación termoeconómica.

Tabla 2. 2. Valores típicos del exponente m de la ecuación termoeconómica para varias plantas completas

Planta completas	Variable	Rango de tamaño	Exponente m
Planta de aire	Rata de aire seco comprimido	0.1-100 Nm ³ /s	0.70
Dióxido de carbono (gas o líquido)	Rata de flujo de producto	450-1800 t/d	0.72
Planta de cogeneración	Potencia	5-150 MW	0.75
Energía eléctrica	Potencia	1-1000 MW	0.80
Purificación de gas natural	Rata de flujo de producto	18-270 t/d	0.75

Un resumen completo de los valores de α , la cual es m en nuestro caso, se puede consultar en Bejan et al. (1996). Las Tablas 2.1 y 2.2, son muy útiles, porque muestran parte de la información requerida por la ecuación termoeconómica, facilitando la obtención del resto de los parámetros de la ecuación con el método de los mínimos cuadrados, pero en caso de tener alguna información estas constantes se pueden evaluar directamente.

2.3.3 Evaluación de las constantes de la ecuación CTL

Cuando la información obtenida del equipo o sistema a evaluar con la ecuación de capital total invertido no es completa, se recomienda asumir una (m) o dos (m y n) de las constantes para obtener las restantes (B y/o n) a través del reconocido método de los mínimos cuadrados. Pero cuando hay suficiente información es preciso determinar estas constantes, contrastando toda la información y haciendo algunos supuestos, los cuales se explican más adelante.

Por ejemplo el CGAM de la Figura 2.1, genera 30 MW de energía eléctrica neta y 14.0 kg/s de vapor saturado a 20 bares (Tsatsaronis y Pisa, 1993; otros) para los cuales se determinaron las siguientes relaciones para m , n y B , para el compresor de aire (CA), el precalentador de aire (PR-A), la cámara de combustión (CC), la turbina de gas (TG) y el recuperador de calor y generador de vapor (HRSG), como se muestra en la Tabla 2.3.

Tsatsaronis y Pisa (1993), hicieron la evaluación de las constantes para un compresor de aire (CA) en el sistema de cogeneración, bajo ciertas condiciones de operación conocidas y los costos de inversión, las cuales se obtienen de la Ec. 2.10.

Tabla 2.3. Valores de las constantes de la ecuación termoeconómica, para el CGAM (Tsatsaronis y Pisa, 1993)

Componente	B	n	m
CA	44.41	3.157	0.8
PR - A	33181.97	0.704	0.6
CC	$372.13 \text{ EXP}(0.01T_4 - 14.89)$	1.000	1.0
TG	$0.043 \text{ EXP}(0.012T_4 - 18.37)$	2.250	2.6
HRSG	39369.81	0.992	0.9

$$Z_{CA} = 39.5\dot{m}_a \left(\frac{1}{0.9 - \eta_{CA}} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2.10)$$

Donde \dot{m}_a es el flujo másico de aire que entra al compresor, η es la eficiencia isentrópica y P_2/P_1 es la relación de compresión.

En la Tabla 2.4, se muestran cuatro condiciones de operación (CO) del compresor de aire. Para cada condición de operación, se relaciona la eficiencia isentrópica, la relación de compresión, la eficiencia exergetica y los flujos de exergías.

Tabla 2.4. Condiciones de operación (CO) y costos de inversión calculados de acuerdo a la Ec. 2.10 para el compresor de aire en el CGAM

CO	η_{AC}	P_2/P_1	\dot{E}_P (MW)	\dot{E}_D (MW)	ε (%)	Z_{eva} (k\$)
(1)	0.880	6.0	22.882	1.714	93.03	2296
(2)	0.875	7.0	24.518	1.829	93.07	2234
(3)	0.870	8.0	26.293	1.953	93.09	2216
(4)	0.820	10.0	32.307	3.130	91.17	11856

Para obtener los valores de las constantes a partir de los datos de la Tabla 2.4, se emplea el método de mínimos cuadrados, el cual se puede obtener directamente con un programa estadístico (STATGRAPHIC®), que en adelante representaremos como PS, con lo que se establece la desviación de la inversión con respecto a la inversión calculada por la Ec. 2.10. En la Tabla 2.5, se relacionan los valores obtenidos por mínimos cuadrados, tanto por el programa estadístico como los reportados por Tsatsaronis y Pisa (1993). Para cada caso se calcula el error relativo ($E.R$) y el error relativo promedio de las desviaciones; cada desviación del error relativo se obtiene de la Ec. 2.11.

$$\%E.R = \frac{Z_{eva} - Z_{cal}}{Z_{eva}} * 100 \quad (2.11)$$

Tabla 2.5. Costos de Inversión calculados a partir de la ecuación termoeconómica para B , n y m obtenidas por PS y Tsatsaronis et al. (1993)

Constantes Tsar ⁽¹⁹⁹³⁾	Z_{cal} (k\$)	$Z_{eva} - Z_{cal}$ (k\$)	$\%E.R$	Constantes STATG.	Z_{cal} (k\$)	$Z_{eva} - Z_{cal}$ (k\$)	$\%E.R$
$B = 36.31$	2072	224	9.75	$B = 1.3E13$	2295.9	0.1	0.0043
$n = 3.26$	2234	0	0.00	$n = -6.18$	2234.0	0.0	0.0000
$m = 0.80$	2387	-171	-7.71	$m = 0.16$	2215.9	0.1	0.0045
	1182	10674	90.03		11856.0	0.0	0.0000
Promedio			23.01	Promedio			0.0022

Los valores de los parámetros obtenidos por PS tienen una desviación promedio pequeña en comparación con las calculadas por Tsatsaronis et al. (1993), pero los parámetros de estos últimos están más acorde con la realidad, debido a que cumple con los siguientes supuestos:

1. Que el logaritmo natural de la inversión de capital para adquirir y poner en funcionamiento el equipo k sea igual a la suma de las inversiones por condiciones de operación, desempeño y tamaño del equipo. Esta relación se obtiene de aplicar logaritmo natural a la Ec. 2.1, la cual queda así:

$$\ln(I_k) = \ln(B_k) + n_k \ln\left(\frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k}\right) + m_k \ln(\dot{E}_{P,k}) \quad (2.12)$$

2. Como los tres factores de la Ec. 2.12 son inversiones para adquisición y funcionamiento del equipo, entonces B no puede tomar valores menores o iguales a cero, mientras que n y m no pueden ser menores que cero. Con esto se garantiza que ninguno de los tres conceptos de inversión tengan el efecto contrario, es decir, queden relacionados como ingresos. En el caso que B sea menor o igual a cero, entonces la ecuación no representaría una inversión sino un ingreso ($B < 0$) o no tendría ningún costo ($B = 0$); en caso que n y/o m sean menores que cero los términos donde se relacionan cada una de estas constantes también serían ingresos; por lo tanto, se debe cumplir con las siguientes restricciones en las variables:

$$\begin{cases} B > 0 \\ n, m \geq 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

En caso que no se cumpla la restricciones de B , entonces los términos que contienen a n y/o m asumen el costo dejado de relacionar por el término que contiene a B . De igual manera ocurre con las demás funciones que no cumplan con las restricciones.

3. Cuando la eficiencia exergética se acerca a la máxima, la inversión se hace más grande, es decir que para alcanzar mayores eficiencias, mayor es el esfuerzo monetario que se debe realizar. Esta situación se puede evidenciar en la Fig. 2.2, la cual muestra en la ordenada el cociente entre la inversión obtenida en el punto de exergía ε_i entre la inversión obtenida en el punto de exergía ε_{i+1} , a partir de la Ec. 2.1 y los valores de las constantes calculadas por Tsatsaronis et al. (1993).

Nótese que en la Figura 2.2 los valores iniciales del cociente de la inversión tienen pendiente positiva, luego llega a un punto de inflexión en la mitad de la eficiencia para luego tener una pendiente negativa en valores de eficiencia mayores. Algo importante presentado en esta figura, es que se puede tener un estimativo de la inversión que se requiere para aumentar en un punto la eficiencia con la tecnología actual.

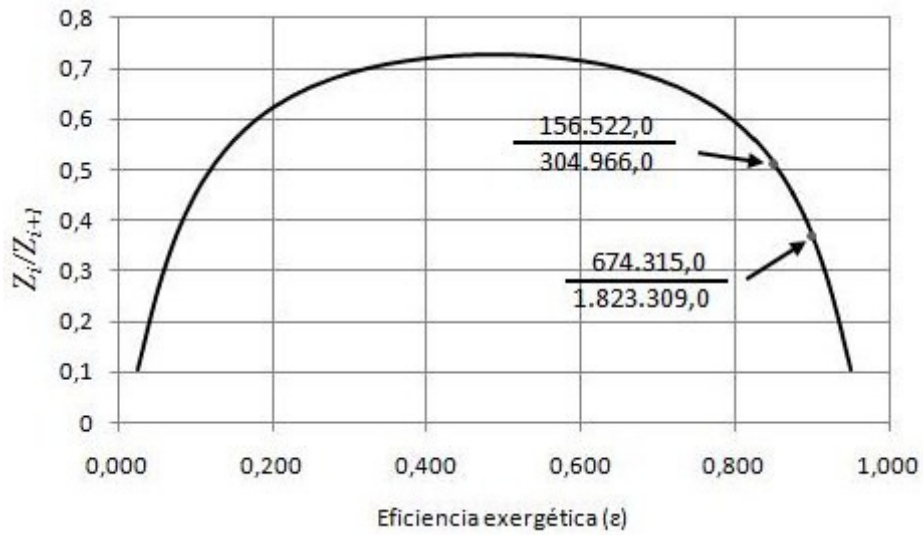


Figura 2.2. Relación del cociente de ingresos con la eficiencia exergética a partir de la ecuación termoeconómica y las constantes B , n y m (Tsatsaronis, 1993)

Teniendo en cuenta los supuestos anteriores, los valores de las constantes obtenidas por el PS, no cumple con las restricciones. La Figura 2.3, muestra el cociente de las inversiones contra la eficiencia exergética, tanto para el caso del programa como el caso planteado por Tsatsaronis et al. (1993). La curva punteada de la Figura 2.3, representa el cociente de la inversión en función de la eficiencia para las constantes obtenidas por el PS. Esta curva muestra, para datos altos de eficiencia exergética, que un aumento en la eficiencia exergética en zonas altas, hace que el cociente de la inversión también aumente, lo que va en contravía del supuesto 3. En este caso se tendría que el esfuerzo económico para maximizar la eficiencia del equipo o sistema tiende a ser cada vez es menor, lo cual no está de acuerdo con los casos reales. Los valores de las constantes obtenidos con los métodos PS, a pesar que presenta desviaciones pequeñas de los valores de la inversión, no cumple con varias de las restricciones sugeridas, mientras que con el método de los mínimos cuadrados planteado por Tsatsaronis et al. (1993), cumple con las restricciones pero con desviaciones altas en los valores de inversión.

Si se reduce la desviación del error relativo promedio, no puede ser a expensas de constantes por fuera de las restricciones y los supuestos relacionados con la inversión para la adquisición y funcionamiento del equipo o sistema, por lo tanto se hicieron los siguientes planteamientos a partir de las Ecs. 2.12 y 2.13, buscando encontrar valores adecuados de las constantes:

- a. Si aislamos la inversión debido a los cambios de eficiencia del resto de la inversión en la Ec. 2.12, entonces se tendría:

$$\ln(I_{\varepsilon}) = n_k \ln\left(\frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k}\right)$$

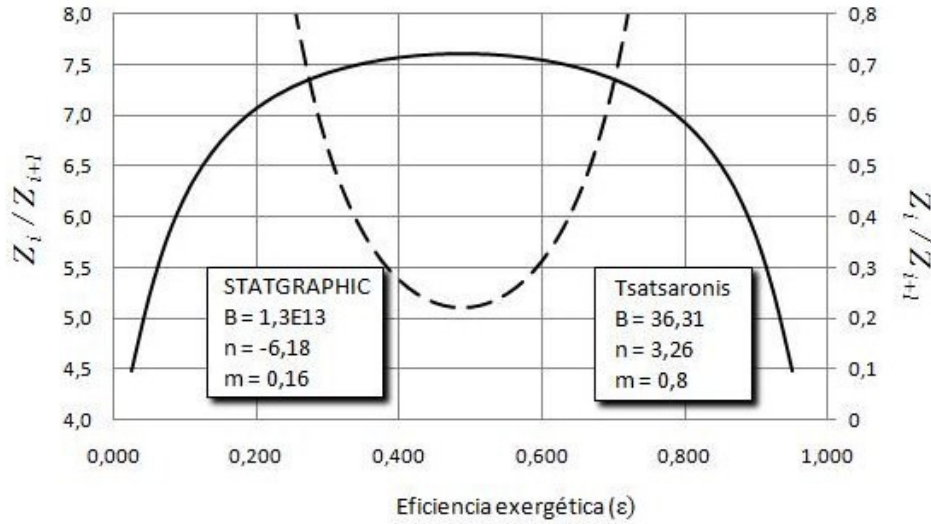


Figura 2.3. Cociente de las inversiones vs eficiencia exergética para evaluación de las constantes B , n y m en los casos PS y Tsatsaronis et al. (1993)

Y a la vez, asumimos que los cambios de la eficiencia tiene una relación lineal con n , entonces esta dejaría de ser una constante y estaría relacionada con la siguiente ecuación:

$$\dot{n}_k = a \ln \left(\frac{\dot{a}_k}{1 - \dot{a}_k} \right) + b$$

Entonces los valores de \dot{n} , dependería de los cambios de \dot{a}_k y de las constantes a y b , donde a es la pendiente y b es el intercepto de una línea recta.

- b. De igual manera, si se aísla la inversión debido al tamaño del equipo o sistema, tenemos:

$$\ln(I_{\dot{E}_{p,k}}) = m \ln(\dot{E}_{p,k})$$

Asumiendo que los cambios en el tamaño tienen una relación lineal con m , esta dejaría de ser lineal y se tendría la siguiente relación:

$$\dot{m}_k = c \ln(\dot{E}_{p,k}) + d$$

El valor de \dot{m} depende de los cambios del tamaño $\dot{E}_{p,k}$ y de las constantes c y d , donde c es la pendiente y d el intercepto de una línea recta.

- c. Finalmente, como B no tiene relacionada otra constante, se asume que tiene una relación lineal con la inversión total, con lo que se tendría la ecuación:

$$\dot{B}_k = e I_k + f$$

En este caso el valor de \hat{B} depende linealmente de la inversión total, siendo e la pendiente y f el intercepto de la línea recta.

Con los planteamientos anteriores y considerando que las Ecs. 2.1 y 2.12 representan la variación de la inversión en un equipo o sistema, en función de la eficiencia, la capacidad y las condiciones de operación, las constantes n , m y B se convierten en \hat{n} , \hat{m} y \hat{B} que son ecuaciones lineales cuyas relaciones permiten que el error relativo promedio sea menor que el calculado con respecto al método de cálculo con los mínimos cuadrados, satisfaciendo totalmente las restricciones que condicionan los valores de estos parámetros. La Ec. 2.12 se convierte en la siguiente ecuación (Ec. 2.19), representando una línea recta “promedio” para los siguientes casos:

$$\ln(I_k) = \ln(\hat{B}_k) + \hat{n}_k \ln\left(\frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k}\right) + \hat{m}_k \ln(\dot{E}_{P,k}) \quad (2.19)$$

Caso 1. Que el valor de B , permanezca constante y que la eficiencia exergética sea constante. En este caso m sería la pendiente y la inversión cambiaría con la exergía producida (tamaño del equipo o sistema).

Caso 2. Que el valor de B , permanezca constante y que la exergía producida permanezca constante. En este caso n sería la pendiente y la inversión cambiaría con la eficiencia exergética.

Caso 3. Que los valores de eficiencia exergética y de exergía producida permanezcan constantes. En este caso la inversión cambiaría con el valor de B , lo cual sugiere una línea recta de pendiente 1.

Cada caso está asociado con el origen de la variación en la inversión expresado por la Ec. 2.1. Si la inversión es afectada por la capacidad, entonces las variaciones se relacionan al caso 1; si es afectada por la tecnología, entonces las variaciones se relacionan con el caso 2; y si es afectada por las condiciones de operación, entonces las variaciones se relacionan con el caso 3. Cuando hay variación de todos los parámetros simultáneamente, se deja como variable el que mayor influencia tenga en las variaciones de la inversión y los otros factores se fijan con los promedios de las variaciones que causen en la inversión.

En la Tabla 2.6, se muestran los resultados obtenidos al aplicar las relaciones de las Ecs. 2.14 a 2.19, donde se evidencia que los valores de n y m se mueven en rangos cortos, mientras que el valor de B toma rangos mucho más amplios, razón por la cual se observa la influencia de cambios en las condiciones de operación, como principal factor de variación en la inversión; sin embargo, los valores de n y m para la última condición de operación se alejan un poco del valor inicial, lo que permite deducir que el cambio en las condiciones de operación afectan el desempeño y la capacidad de carga del equipo o sistemas. El cálculo de los valores de \hat{n} , \hat{m} y \hat{B} permiten que el error promedio baje de 23.01 a 1.18%,

permitiendo mostrar cuales son las características del equipo o sistema que hacen que se generen los cambios en la inversión.

Tabla 2.6. Resultados de la inversión con respecto a parámetros exergoerconómicos calculados por ecuaciones lineales para los casos de 1 al 3

Constantes	\dot{n}_{cal}	\dot{m}_{cal}	\dot{B}_{cal}	Z_{cal} (k\$)	$Z_{eva} - Z_{cal}$ (k\$)	%E.R
$a = -1.32$	3.259	0.8000	40.23	2296	0	0.00
$b = 6.68$	3.251	0.7838	39.15	2239	-5	-0.22
$c = -0.23$	3.247	0.7674	38.83	2223	-7	-0.31
$d = 1.53$	3.598	0.7191	207.8	11264	592	5.26
$e = 1.75E-5$						
$f = -1.99E-6$						
Promedio	3.339	0.7676	81.50	-	-	1.18

La Tabla 2.6, muestra que los parámetros de la ecuación termoeconómica cumplen con las restricciones y la Figura 2.4 es una muestra cualitativa que satisface los supuestos entre la inversión y la eficiencia del equipo para valores constantes de la exergía producida.

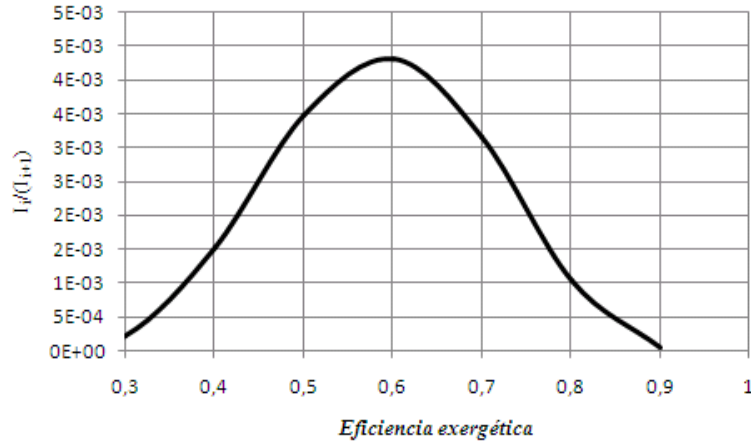


Figura 2.4. Cociente de las inversiones vs eficiencia exergética para evaluación de \dot{B} , \dot{n} y \dot{m} con \dot{E}_p constante

RESUMEN

A principios de los años 90's, paralelo al desarrollo de la termoeconomía, se propuso una teoría general de optimización de sistemas energéticos basada en la minimización de una función objetivo que relaciona los costos debido a la eficiencia, tamaño y condiciones de operación de los equipos del sistema energético, respetando sus condiciones termo-físicas (Tsatsaronis et al., 1993; Bejan et al., 1996). El método de optimización propuesto integra el modelo físico con el modelo económico del sistema, pero queda limitado debido a que los tres factores termoeconómicos que complementan la función objetivo, son constantes con valores que a pesar de ser obtenidos por el método de mínimos cuadrados, no permiten que la función objetivo alcance valores adecuados en algunos tramos de

los rangos de operación de cada una de las variables de decisión del sistema. En otras palabras, el modelo funciona bien para segmentos específicos del rango en las variables de decisión, haciendo necesario modificar las constantes para que los rangos restantes hagan que el modelo también funcione adecuadamente. La situación planteada, hizo que la optimización de sistemas energéticos se hiciera hasta hoy con el modelo físico y económico de manera separada.

En este capítulo, se retoma la optimización de la función objetivo integral y se plantea un método de ajuste de los parámetros termoeconómicos que permiten a la función objetivo operar adecuadamente para segmentos más amplios de los rangos de operación de las variables de decisión. El método propuesto está basado en separar los costos asociados a la función objetivo y encontrar una relación lineal entre cada uno de los factores termoeconómicos con los cambios relacionados a los costos que los generan, es decir, que se asume que los costos debidos al tamaño del sistema tienen relación lineal con el factor termoeconómico asociado al tamaño del sistema, de igual manera se hace el mismo razonamiento para la eficiencia y para las condiciones de operación.

CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS MULTIOBJETIVO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

INTRODUCCIÓN

El hombre desde tiempos remotos ha buscado alternativas de optimización de recursos, siendo el uso de la energía una de las actividades comunes del hombre que mayor esfuerzo le ha representado, no solo por ser una necesidad para el mundo actual en su funcionamiento y desarrollo; también porque las fuentes para la obtención del recurso cada vez son menores debido al carácter no renovable de los combustibles fósiles. A parte de subsanar la problemática energética global a través de fuentes renovables de energía, uno de los principales retos de la humanidad es buscar tecnologías eficientes para la obtención de exergía a partir de combustibles fósiles (carbón), con lo que se han consolidado sistemas de generación eléctrica a partir de ciclos Rankine simple en multietapas y ciclos combinados.

Los desarrollos teóricos de la optimización de los sistemas energéticos en los últimos años están marcados en la exergoeconomía, teniendo en cuenta que analiza los costos económicos asociados con la generación de exergía, por lo que son más apropiados para un caso real que los obtenidos con un análisis de energía (Sahoo, 2007). El término compuesto Termoeconomía, propuesto por Evans y Tribus en 1962, tiene como propósito esencial estudiar la relación entre la termodinámica y la economía, mencionar las bases teóricas de una nueva disciplina de ahorro energético y obtener modelos que permitan recoger criterios generales para evaluar la eficiencia y el costo de sus productos, en sistemas con un consumo intensivo de energía. En los noventa se presentaron trabajos con una metodología termoeconómica bien argumentada, que favoreció su reconocimiento científico (Lozano y Valero, 1993; Bejan, et al., 1996).

La teoría termoeconómica, propició la presentación de nuevos trabajos y se desarrollaron diferentes aplicaciones a partir de esta. Una vez se comprobó que la teoría termoeconómica permitiera resultados razonables, empezó a aplicarse en diferentes tipos de tecnologías de generación energética; especialmente al sistema general - CGAM (Sahoo, 2007; Tsatsaronis, 1993; Tsatsaronis y Pisa, 1994). Hasta ahora, se han implementado herramientas de optimización en los sistemas de generación de energía (SGE), a partir de conceptos que provienen de la termodinámica y la economía; sin embargo, consideramos que el análisis MO puede complementar la optimización, dado que permite incluir variables del

entorno a un sistema energético complejo (Garduno-Ramirez y Lee, 2001; Galvan et al., 2003).

A nivel exergoeconómico, en los últimos 25 años se han desarrollado metodologías de contabilidad de costos que optimizan y evalúan los sistemas con un enfoque de costo promedio o ejemplificando con costos marginales (Sahoo, 2007; Caputo et al., 2008). Se ha intentado plantear metodologías MO, para la optimización de sistemas energéticos, pero siempre conducen a óptimos locales, sin embargo se han hecho planteamientos que muestran la necesidad de utilizar varios criterios de evaluación para la escogencia de un sistema energético óptimo entre varias posibilidades (Deb, 2002; Manzur, 2007). En la optimización de sistemas energéticos se han asignado pesos para los objetivos económico y ambiental, pero haciendo que este último objetivo adquiera valores equivalentes a costos económicos (Lazzaretto y Toffolo, 2004), es decir, no hay una representación real del impacto ambiental por la generación de residuos. Este tipo de metodología de asignación de pesos a los objetivos, es comunmente denominado método de la ponderación lineal según el glosario multicriterios (<http://www.unesco.org.uy/red-m/glosariom.htm>). Si el decisor es ambientalista, es relevante conocer el impacto ambiental por reducción física de los residuos que su equivalente económico. Otro importante punto de discusión es cómo introducir en el modelo, el análisis del impacto ambiental. Lazzaretto and Toffolo (2004) analizaron el impacto económico por generación de NOx y CO, pero hay indicadores LCA (siglas en inglés: Life Cycle Assessment) para medir el impacto ambiental de sistemas energéticos. Los LCA han sido utilizados ampliamente en procesos de conversión de energía, donde la medida del impacto ambiental se relaciona con el consumo de combustible, así como la construcción, mantenimiento y disposición de los componentes de la planta. La metodología LCA, relaciona el impacto ambiental con todos los componentes del proceso de conversión de energía, siendo apropiado para el análisis exergoambiental, la cual es una combinación basada en la metodología del análisis exergoeconómico (Meyer et al., 2009), sin embargo no hay evidencias de casos de optimización de sistemas energéticos donde se estudien aspectos relacionados con su entorno sin aislamiento termoeconómico.

Este capítulo se basa en una metodología para resolver problemas MO utilizando las ventajas de los modelos termoeconómicos de la ecuación termoeconómica estudiados en el capítulo anterior y los AG aplicando ponderación lineal. Tanto los modelos termoeconómicos de la ecuación termoeconómica como los AG son adecuados para incluir un amplio número de variables, inclusive las variables externas dentro del análisis global del sistema energético. El propósito es evaluar, a partir de criterios de optimización, la influencia de los factores externos y la interacción entre el sistema energético y su entorno. La variable externa considerada en este trabajo es el tipo de combustible sólido (carbón), abundante en algunos sectores de Colombia, con el que se completan tres objetivos para estudiarlos teóricamente. En general, por un lado se pretende minimizar la generación de residuos (cenizas); este objetivo puede ser sustituido por el de la minimización de los indicadores LCA o minimización de los gases invernaderos.

Por otro lado, simultáneamente se requiere minimizar el costo exergoeconómico y maximizar la eficiencia exergética.

3.1 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS MULTIOBJETIVO (MO)

Se plantea la necesidad de tomar decisiones frente a una situación particular, la cual consiste en el diseño de un SGE, considerando el efecto producido por diferentes factores de manera simultánea. Esto motiva la aplicación del análisis multiobjetivo, el cual incluye una función objetivo obtenida del análisis termoeconómico y, debido a las características del problema, se consideran otras funciones objetivo que persiguen intereses distintos al económico y termoeconómico, pero que están influenciados por estos; lo que genera un problema de múltiples funciones objetivo.

El análisis multiobjetivo es requerido para describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, con base a una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo a varios criterios (Red Iberoamericana de Evaluación y Decisión Multicriterio, 2006).

Los criterios o atributos, son los puntos de vista considerados relevantes para el análisis y/o resolución de un problema, los cuales constituyen la base para la toma de decisiones que puede ser medida y evaluada. Son la evidencia sobre la cual se basa una decisión, o dicho de otro modo es un aspecto medible de un juicio, por el cual puede ser caracterizada una dimensión de las alternativas bajo análisis. Estos criterios pueden representar diferentes aspectos de la teleología: objetivo, metas, valores de referencia, niveles de aspiración o utilidad. En el planteo de la matriz de decisión o en la caracterización de un problema, la identificación de los criterios pertinentes al mismo es de gran importancia para el logro de los objetivos. La forma en que puede ser medido o caracterizado el criterio también es un aspecto de gran importancia, ya que de ello dependerá en gran parte el resultado final del proceso de evaluación

Un problema de múltiples objetivos, se puede representar matemáticamente mediante un vector de p dimensiones, en donde cada dimensión representa una función objetivo (F), que a su vez es una función de n variables x , así:

$$F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_p(x)] \quad (3.1)$$

Cada uno de los objetivos es a su vez función del vector x de variables de decisión. Para el caso concreto, se tendría un vector donde p toma eventualmente un valor numérico, y x es un vector que constituye la variable de decisión. p corresponde a la cantidad de objetivos generales a tener en cuenta. El análisis multiobjetivo se puede representar gráficamente a través de un plano de dos ejes coordenados que representan los objetivos, para el caso de tener dos funciones objetivo únicamente. Se puede tener, por ejemplo, el objetivo termoeconómico (costo monetario para la formación del costo exergético unitario del producto); y el ambiental los cuales definiremos como F_1 y F_2 , respectivamente. Como los

costos y la contaminación ambiental son dos objetivos que se pretenden minimizar, se toman los ejes de coordenadas positivos multiplicando dichos objetivos por menos uno, es decir que serían $-F_1$ y $-F_2$.

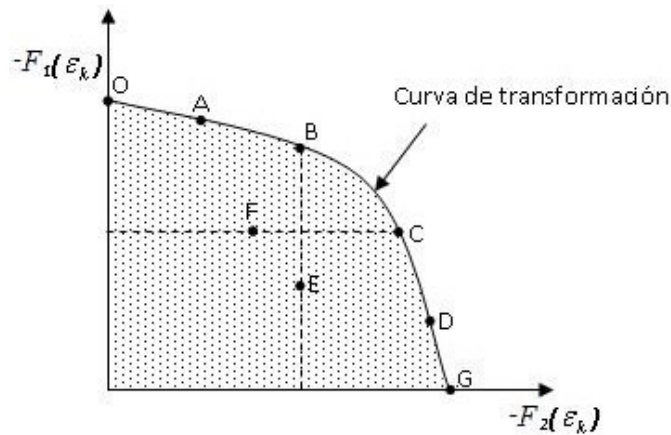


Figura 3.1. Representación de las soluciones no dominadas (Smith et al., 2000)

La Figura 3.1 muestra que los puntos E y F están dominados por los puntos B y C respectivamente, la curva de transformación representa una gama de soluciones que son las mejores y, sobre la cual se debe definir un punto como la óptima. Si se elige el punto A como solución, por ejemplo, quiere decir que hay bajos costos para la obtención del producto, pero se castiga la decisión con una alta producción de contaminante; esto puede suceder porque se escogió una tecnología barata e ineficiente para este proceso.

Para tomar la decisión se toman criterios de decisión o se acude a la preferencia del decisor. El análisis multiobjetivo constituye una forma de modelar los procesos de decisión, en los que entran en juego: una decisión a ser tomada, los eventos desconocidos que pueden afectar el o los resultados, los posibles cursos de acción, y el o los resultados mismos. Mediante los modelos multiobjetivo, el decisor podrá estimar las posibles implicaciones que puede tomar cada curso de acción, de modo a obtener una mejor comprensión de las vinculaciones entre sus acciones y sus objetivos. Los elementos que son objeto de estudio por el análisis multiobjetivo son de tipo amplio: proyectos, políticas, cursos de acción, etc.

La Figura 3.2, hace la representación de un sistema global, en el que interactúan simultáneamente múltiples objetivos, los cuales a manera de ejemplo denominaremos termoeconómicos, ambientales y técnicos; en el que se pretende identificar la mejor o las mejores soluciones y evaluar el desempeño de un sistema energético en un entorno posible. El propósito del análisis multiobjetivo, es encontrar valores favorables de todas estas variables en conflicto. Es claro que, una buena respuesta termoeconómica, repercute en un valor desfavorable ambientalmente; esto mismo pasa al comparar otras variables entre sí, por lo tanto, no se puede lograr un óptimo ideal, sino un conjunto de soluciones óptimas excluyentes entre sí, de las cuales se debe escoger una, según el criterio del decisor o de los decisores.

Obsérvese que se tiene referenciado el entorno del sistema con una malla, queriendo con ello indicar que, el desempeño (ξ) del sistema global, puede tomar valores diferentes cuando se cambia el entorno donde interactúa el sistema.

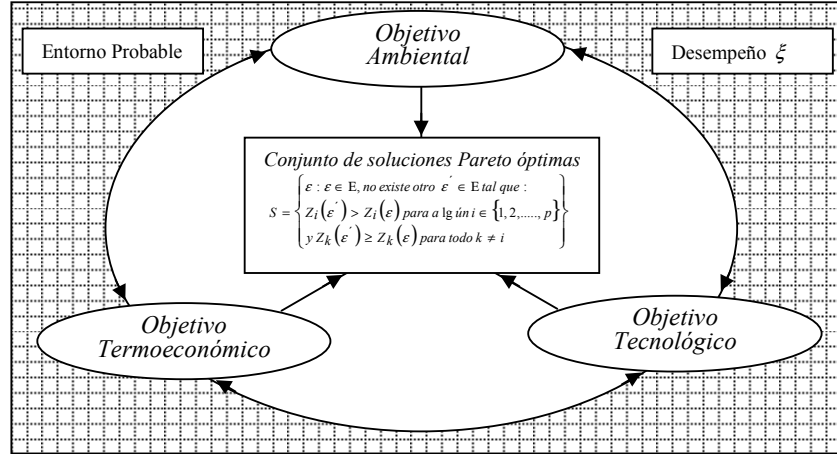


Figura 3.2. Representación de un Sistema Energético Afectado por Múltiples Objetivos en un Entorno Probable

El conjunto de soluciones óptimas o no dominadas puede definirse, para el caso en que todos los objetivos se estén maximizando, como el conjunto S (Goicochea y otros - 1982):

$$S = \left\{ \varepsilon : \varepsilon \in E, \text{no existe otro } \varepsilon' \in E \text{ tal que :} \right. \\ \left. \begin{aligned} &F_i(\varepsilon') > F_i(\varepsilon) \text{ para al menos } i \in \{1, 2, \dots, p\} \\ &\text{y } F_k(\varepsilon') \geq F_k(\varepsilon) \text{ para todo } k \neq i \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

En donde p representa el número de objetivos considerados, $Z_i(\varepsilon)$ es el valor del objetivo i para la solución ε , y E el espacio de soluciones posibles. Es evidente entonces, a partir de la definición de S , que si en el espacio de los objetivos, uno se mueve de una solución no dominada a otra y una función objetivo mejora, entonces una o más de las otras funciones objetivo deben tener peores valores.

Como se nota, el análisis multiobjetivo, no evalúa una única alternativa de escogencia, como resulta en la teoría clásica de la decisión. La teoría del análisis multiobjetivo analiza de manera simultánea, un conjunto de objetivos a maximizar (y/o minimizar), los que a su vez genera una serie de posibles alternativas de escogencia, entre una un conjunto de soluciones optimas excluyentes entre sí. Muchas aplicaciones se han desarrollado en torno al análisis multiobjetivo, lo que ha permitido construir un lenguaje que identifica los principales conceptos de esta teoría. A continuación se repasan algunos de los conceptos, del contexto de la teoría del análisis multiobjetivo y, que son útiles para explicar algunos apartes de este trabajo.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA TÉRMICO MULTI OBJETIVO (MO)

Para describir el problema MO se parte de un sistema, tal como se muestra en la Figura 3.3, el cual es un poco más complejo que el CGAM, debido a que tiene tres equipos más y por consiguiente más corrientes para analizar. Este sistema está formado por un subsistema I, planteado por P.K. Sahoo (2007) para su aplicación metodológica, que genera 50 MW y 15 lb/s de vapor saturado a 22,5 psig. El subsistema II, es un gasificador que suministra de gas sintético al subsistema I. En este caso se hace una modificación al sistema de Sahoo, el cual emplea como recurso gas natural, reemplazado en este caso por el gas sintético obtenido, procurando mantener las propiedades exergéticas del gas natural, de tal manera que los recursos empleados sean equivalentes. La motivación para el cambio de gas natural por el gas sintético, obedece a que se pretende analizar diferentes tipos de combustibles sólidos, cuya gasificación contribuye a la alimentación del ciclo combinado. Para subsistema II, se tomaron datos del documento Gasification Alternatives for Industrial Applications, del departamento de energía de EU (2004).

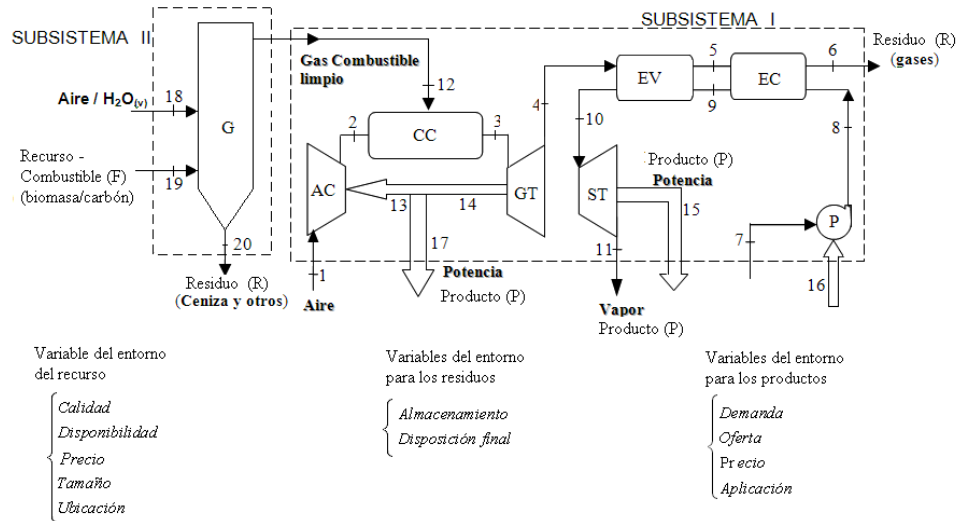


Figura 3.3. Planta de cogeneración (Subsistema I) integrada a un gasificador (Subsistema II)

Si se analiza en la parte inferior de la Figura 3.3, se puede notar que se incluyen aspectos relacionados con las variables del entorno del sistema, esto con el fin de evaluar las condiciones del medio que afectan los recursos, los productos y los residuos, y a su vez evaluar cómo afectan estos al sistema de manera global. Por ejemplo, para el caso que el recurso sea carbón, como es este caso, habrá factores que condicionan el suministro, tales como la calidad, la disponibilidad, el precio, el tamaño y la ubicación del proveedor.

Como se explicó en el capítulo anterior, para sistemas energéticos complejos se han diseñado dos maneras de optimización, el más utilizado es desarrollar modelos termodinámicos y modelos económicos, con lo que se evalúan condiciones de operación de cada uno de los equipos (variables de decisión) buscando minimizar los costos a través de una función objetivo termoeconómica; el otro modelo de optimización, menos utilizado, es el que utiliza la formulación de la ecuación termoeconómica. La diferencia entre estos métodos, es que el primero intenta optimizar variables internas del sistema, mientras que el segundo inicialmente es formulado para optimizar variables internas cuando no se tiene información suficiente (casos reales), razón por la cual tiene la ventaja de poder utilizarse para evaluar variables externas, incluso en condiciones de no aislamiento termoeconómico por razones ya expuestas.

3.2.1 Descripción de los objetivos en el problema MO

Comúnmente, la función objetivo para la optimización de los sistemas energéticos está sujeta a minimizar el costo exergético unitario del producto generado de cantidad conocida, obtenido por la suma de los costos del combustible y de los costos de los equipos del sistema nivelados a un año. En este trabajo, se conservan los criterios de minimización del costo exergético unitario, pero se incluye el costo exergético de diferentes combustibles y el precio exergético de venta del producto en el mercado de energía Colombiano, lugar escogido como escenario del problema. La inclusión del precio exergético en el modelo tiene como finalidad determinar el comportamiento de las variables de diseño del modelo en casos de ingresos fijos altos y/o bajos, pero también se puede utilizar en un futuro para ingresos variables o inciertos (Ver capítulo 5).

Los ingresos se representan con la Ec. (3.3), donde se muestran dos parámetros principales. Uno es el precio exergético unitario promedio del producto (\bar{p}_p) y el otro es la exergía generada (\dot{E}_p) en un tiempo (τ).

$$Re_k = \bar{p}_{p,k} \dot{E}_{p,k} \tau \quad (3.3)$$

Como la eficiencia exergética ε es el cociente entre la exergía del producto (\dot{E}_p) y la exergía del recurso (\dot{E}_F), o lo que es lo mismo $\dot{E}_{p,k} = \varepsilon \dot{E}_{F,k}$, con lo que tenemos:

$$Re_k = \bar{p}_{p,k} \varepsilon \dot{E}_{F,k} \tau \quad (3.4)$$

Teniendo en cuenta que el flujo de exergía del recurso, se obtiene de la multiplicación del flujo másico del combustible (\dot{m}_T) con el producto de las fracciones de cada combustible (X) por el poder calorífico de cada combustible (PC) (Ver Ec. 3.5)

$$\dot{E}_F = \dot{m}_T (PC_1 X_1 + PC_2 X_2 + \dots PC_n X_n) \quad (3.5)$$

Para maximizar los ingresos (Re) en la Ec. 3.4, se requiere que haya aumento de la eficiencia exergética y el precio del producto, siempre que la exergía del recurso se mantenga fija, es decir, que para alcanzar valores altos de los ingresos es necesario que la eficiencia sea alta y/o que el precio también lo sea. Sin embargo, se ha comprobado que si la eficiencia es alta, los costos por compra de equipos también son altos (Sahoo, 2007), con lo que se aprecia un aumento en los ingresos debido a la reducción de costos de combustibles a costa de un mayor costo por compra de los equipos. Esto sugiere que se acoja una función objetivo integral, que incluya los ingresos y los costos totales, la cual queda representada adecuadamente con la Ec. 3.6 o ecuación de utilidad.

$$U_k = \bar{p}_{P,k} \varepsilon_k \dot{m}_T \tau \left(\sum_{i=1}^n P C_{F,i} X_{F,i} \right) - C_T \quad (3.6)$$

Donde la exergía específica del recurso está formada por las capacidades caloríficas de los n combustibles y C_T son los costos totales formados por los costos de cada combustible y los costos de los q equipos que conforma el sistema, los cuales se representan con la siguiente ecuación:

$$C_T = C_F + \sum_{k=1}^q Z_k \quad (3.7)$$

En la Ec. (3.7) C_F se puede representar en función de costos de los n combustibles que participan en el escenario del sistema térmico, esto es:

$$\begin{cases} C_F = \dot{m}_F \tau \sum_{i=1}^n c_{F,i} P C_{F,i} X_{F,i} \\ \dot{C}_F = \dot{m}_F \sum_{i=1}^n c_{F,i} P C_{F,i} X_{F,i} \end{cases} \quad (3.8)$$

En la Ec. 3.8, se debe tener en cuenta que la suma de la composición másica de los combustibles es uno, es decir que $X_{F,1} + X_{F,2} \cdots X_{F,n} = 1$. Con la maximización de las utilidades, se puede minimizar los costos de los equipos a través de la variación de las condiciones de operación, tal como ha sido el interés fundamental de la optimización de los sistemas energéticos a través de los años, pero los costos y calidad del combustible tienden a maximizarse al relacionarlos con el precio exergético del producto, haciendo que la función objetivo (utilidad) genere efectos contradictorios entre minimizar los costos de los equipos en detrimento de la eficiencia exergética o maximizar el ingreso en detrimento de la calidad del combustible. Como no hay claridad entre las decisiones a seguir por los efectos contradictorios de la función objetivo, se requiere de una función adicional que defina las preferencias del decisor con base en las ventajas que se tengan sobre un sistema de referencia. Otra alternativa para el decisor con respecto a la función objetivo de utilidad, es separar esta función en dos funciones objetivo, en la que una de estas intente maximizar la calidad del combustible y la

otra minimizar los costos de los equipos, relacionando alguno de estos objetivos con el precio del producto. Esta última alternativa se analiza en los capítulos 4 y 5.

La última parte del párrafo anterior, sugiere establecer una función objetivo que permita establecer diferencias entre dos sistemas evaluados simultáneamente. La función objetivo adicional aumenta la complejidad del problema, porque hace que el modelo además de ser MO, incremente las variables de decisión; por otra parte, el análisis involucra sustancialmente aspectos del entorno por lo tanto, se plantea hacer los análisis para sistemas globales a partir de la ecuación termoeconómica (Ec. 2.1), estudiada ampliamente en el capítulo anterior. Con esta ecuación, se tiene en cuenta la eficiencia exergética óptima de todo el sistema y no las condiciones de operación óptimas de cada equipo, las cuales están integradas a la eficiencia exergética del sistema global. La función objetivo se escribe de manera general así:

$$-Ah_k = C_T - C_{T,o} \quad (3.9)$$

Al combinar las Ecs. (2.6) y (3.3) se pueden tener los costos totales, tanto para el sistema a evaluar (Ec. 3.10) como para el sistema de referencia (la Ec. 3.10, se puede replicar para el sistema de referencia identificando cada variable con el subíndice - o), en función de las exergías ($\varepsilon_k = \dot{E}_{P,k}/\dot{E}_{F,k}$) y la calidad y costo de los combustibles, que provienen de la Ec. 3.8.

$$C_T = \tau \dot{C}_F + \dot{E}_{P,k}^m (\beta_k + \gamma_k) B_k \left(\frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k}} \right)^n + \tau \dot{E}_{P,k} \omega_k + R_k \quad (3.10)$$

Así, el término para evaluar la diferencia en el gasto de combustible o recurso F entre el sistema evaluado y el convencional para producir la misma cantidad de exergía (producto P), para el mismo tiempo de operación, sería:

$$\Delta F = C_F - C_{F,o} = \tau (c_{F,k} \dot{E}_{F,k} - c_{F,ko} \dot{E}_{F,ko}) \quad (3.11)$$

Asumiendo que ambos sistemas se evalúan en el mismo entorno, entonces se utiliza la misma mezcla de combustibles durante la optimización, por lo tanto la Ec. (3.11), se describe teniendo en cuenta las Ec. (3.8), de la siguiente manera:

$$\Delta C_F = \tau (\dot{m}_T - \dot{m}_{T,o}) \left(\sum_{i=1}^n PC_i X_i c_{F,i} \right) \quad (3.12)$$

De igual manera que para el combustible, los costos de inversión de capital y los demás costos, también se pueden evaluar estableciendo la diferencia entre los costos de ambos sistemas; así los últimos tres términos de la Ec. (3.10), quedan como sigue.

$$Z_k - Z_{ko} = \theta_k E_{P,k}^m B_k (E_k^*)^n - \theta_{ko} E_{P,k}^{mo} B_{ko} (E_{ko}^*)^{no} + \tau \dot{E}_{P,k} (\Delta \omega) + \Delta R \quad (3.13)$$

Donde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \beta + \gamma \\ E^* = \frac{\dot{E}_P}{\dot{m}_T \sum_{i=1}^n PC_i X_i c_{F,i} - \dot{E}_P} \\ \Delta\omega = \omega_k - \omega_{ko} \\ \Delta R = R_k - R_{ko} \end{array} \right. \quad (3.14)$$

La segunda función objetivo, quedaría:

$$-Ah_k = \Delta_F + \theta_k E_{P,k}^m B_k (E_k^*)^n - \theta_{ko} E_{P,k}^{mo} B_{ko} (E_{ko}^*)^{no} + \tau \dot{E}_{P,k} (\Delta\omega) + \Delta R \quad (3.15)$$

Las Ecuaciones 3.13 y 3.14, son utilizadas por el evaluador para la misma cantidad de producto en los dos sistemas, es decir que $\dot{E}_P = \dot{E}_{P,k} = \dot{E}_{P,ko}$, esto no significa que el tamaño del sistema se mantenga fijo, sino que para un aumento del tamaño en el sistema evaluado, también hay un aumento en el tamaño del sistema convencional, permitiendo así una comparación adecuada entre los costos relacionados de ambos sistemas. El signo negativo de la Ec. 3.15, se debe a que se asume la eficiencia exergética del sistema evaluado mayor que la del sistema convencional ($\varepsilon > \varepsilon_o$), aunque el signo de la función objetivo también depende del costo y la calidad del combustible.

Para optimizar el sistema de la Figura 3.3, se tiene en cuenta un tiempo de vida útil de 20 años y los costos de inversión anualizados a una tasa de 10% (Sahoo, 2007). Los términos restantes de las Ecs. 3.3 a la 3.15, se explican a continuación: el precio exergético unitario del producto (\bar{p}_P), el cual se estima como un promedio, debido a que se pueden presentar productos de diferentes calidades (vapor y electricidad - aunque se pueden evaluar por separado en el mismo análisis), como ocurre en un sistema de cogeneración, el costo exergético unitario del recurso (c_F); los costos generados por la inversión en función de los costos de operación y mantenimiento constantes (β , γ); los costos de operación y mantenimiento variables (ω) y otros costos (R) (Bejan et al., 1996). En los costos de inversión en equipos y de operación y mantenimiento, están incluidos los generados por los equipos de limpieza y de captura de CO_2 . Las variables de funcionamiento del sistema están formadas por la exergía del recurso (\dot{E}_F), la exergía del producto (\dot{E}_P), la masa total de recurso (\dot{m}_T), las fracciones (X_i) y el poder calorífico (PC) de la mezcla de diferentes combustibles (i); los parámetros m , n y B son obtenidas de la ecuación termoeconómica donde se hace una distribución de costos de inversión (Bejan et al. 1996) y k , para el caso estudiado, es el sistema energético completo, pero puede representar cada equipo que conforman el sistema.

Las Ecuaciones 3.6 y 3.15 son funciones objetivo que representan la necesidad de optimizar un sistema térmico a partir del diseño y las relaciones termodinámicas, considerando factores del medio externo que afectan dicho sistema; en este sentido las variables de decisión para la optimización, no solo son derivadas de la configuración del sistema y la calidad de los flujos de las corrientes que interconectan los equipos, también se tiene en cuenta aspectos económicos y de calidad de los recursos (combustibles), productos (energía eléctrica, vapor) y una función objetivo adicional para determinar los residuos (gases exhaustados, cenizas, etc.) requeridos y generados por el sistema energético. La optimización clásica de sistemas energéticos no es suficiente cuando el sistema es tan complejo, porque incluye relaciones matemáticas no lineales y más de una función a optimizar, como se pretende desarrollar en este capítulo.

Los dos objetivos representados por las Ecs. 3.6 y 3.15, evalúan el funcionamiento del equipo o sistema teniendo en cuenta los costos y la eficiencia de los mismos, como también los costos de los recursos del medio, pero como dichos recursos tienen calidades diferentes y afectan el medio ambiente por residuos de la combustión, entonces se incluye una tercera función objetivo que relaciona la cantidad de residuos generados. Hay varios tipos de residuos generados por la combustión de carbón, entre los que se destaca el SO_x, NO_x, CO, CO₂ y las cenizas; sin embargo, debido a que el sistema se considera provisto de un gasificador, se asume que los tres primeros contaminantes del medio ambiente son retenidos en cantidades despreciables. El CO₂ y las cenizas, por el contrario se genera en grandes cantidades y por lo tanto requieren procedimientos de captura o almacenamiento. En este caso, se considera la producción de cenizas y se tiene en cuenta los costos de captura de CO₂ (Borchiellini et al., 2002).

$$\Gamma_Z = \tau \dot{m}_T \sum_{i=1}^n X_i Y_i \quad (3.16)$$

Donde Γ_Z es la cantidad de cenizas producidas durante la operación en un tiempo τ , X es la composición del combustible i en la mezcla e Y es la fracción de cenizas de cada combustible.

3.2.2 Representación gráfica de los objetivos del sistema energético

La optimización a partir de las Ecs. 3.6, 3.15 y 3.16, incluye aspectos de la inversión relacionados con variables del medio. Las condiciones óptimas de operación y eficiencia del sistema, depende del costo de la tecnología utilizada, la calidad y costo del combustible disponible en el medio externo; el tamaño óptimo, además de los aspectos anteriores, también depende de la cantidad de energía requerida y su precio en un mercado delimitado por el entorno político - administrativo.

Con las Ecs. 3.6, 3.15 y 3.16, se intenta demarcar la problemática como un sistema global integrado por el sistema y su entorno. Estas tres funciones, contextualizan el interés del evaluador de la siguiente manera:

- Minimizar los gastos generados por el montaje y operación del sistema para incrementar la utilidad, con respecto al precio de venta del producto en el mercado. Es importante mencionar que el precio de venta del producto puede ser incierto, según el tipo de producto generado y el tipo de contrato con el(los) posible(s) consumidor(es). Para el caso que el producto sea energía eléctrica, se debe tener en cuenta el precio en el mercado o la posibilidad de establecer un contrato a corto, mediano o largo plazo con el consumidor. Existen varias formas de incluir la incertidumbre del precio u otra variable en este objetivo, pero considerando que este trabajo es más orientado a la optimización que la incertidumbre, se hace un análisis básico de incertidumbre del precio de la exergía en el mercado (Ver capítulo 5). La Figura. (3.4), muestra la configuración del objetivo termoeconómico o Ec. 3.6, representado por el triángulo relleno delimitado por una línea que pasa por el origen que representa los ingresos, una línea de pendiente menor a la anterior que se intercepta con los costos fijos en el eje vertical y que representan los costos variables, y una línea vertical que representa la producción máxima de exergía. Los costos fijos hacen referencia a los costos anualizados de los equipos y los costos fijos de operación y mantenimiento; los costos variables constituyen principalmente los costos de los combustibles y en menor importancia los costos variables de operación y mantenimiento.

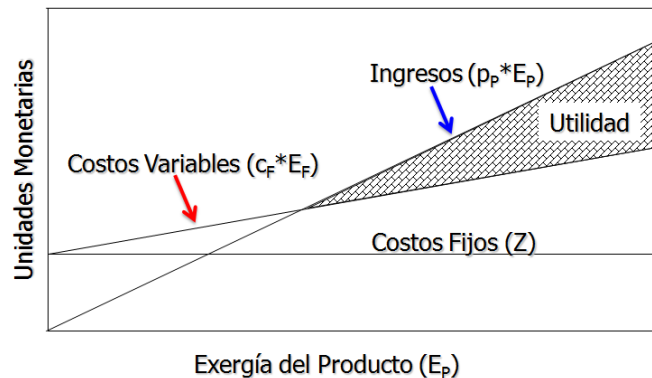


Figura 3.4. Representación del Objetivo Termoeconómico-Ec. (3.6)

- Maximizar el ahorro que se obtiene de optimizar un sistema energético con respecto a otro sistema disponible en el entorno. Esta función permite evaluar económicamente, dos o más proyectos energéticos a través de criterios de evaluación como la TIR o VPN (Frangopoulos y Caralis, 1997). En el capítulo 4 de este trabajo, se propone hacer una evaluación con VPN durante la vida útil de un sistema energético, con respecto a un sistema energético existente que puede ser reemplazado por el primero, antes que cumpla con su vida de utilidad o cuando la termine. Como se mencionó anteriormente, para llevar a cabo este proceso, se tendrá en cuenta la incertidumbre del precio de venta del producto a través de una función de densidad de probabilidad y las diferentes

configuraciones óptimas del sistema, por medio de una simulación año a año del sistema global, durante el tiempo de evaluación o vida útil del sistema energético. Por otra parte, con esta función se puede estimar la tendencia tecnológica de un sistema energético, si se tiene la descripción de los adelantos tecnológicos y las implicaciones económicas acarreadas.

En la Figura 3.5, la porción sombreada muestra el ahorro obtenido al utilizar un sistema más eficiente que otro utilizado para el mismo fin, el cual se identifica como convencional. Es claro que el sistema más eficiente, representa unos costos fijos (Z) más altos que el sistema convencional, debido a que se hace una mayor inversión en equipos con mayores adelantos tecnológicos, que permiten reducir la destrucción de exergía. Caso contrario ocurre con los costos variables o costos de combustibles (CV), donde se muestra claramente que el sistema más eficiente tiene una pendiente menor que los costos variables del sistema convencional.

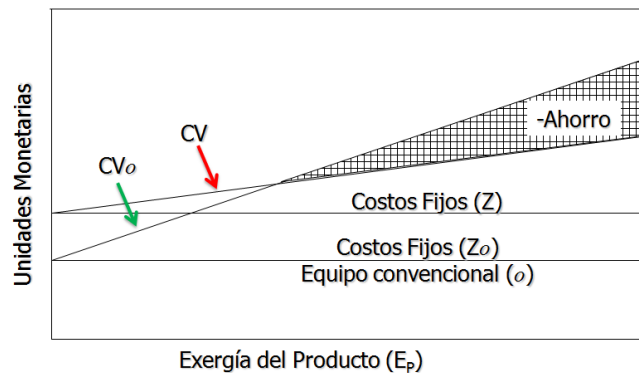


Figura 3.5. Descripción del Objetivo Tecnológico-Ec. 3.15

La figura muestra que los altos costos fijos o costo de equipos de un sistema eficiente, puede representar un ahorro, cuando se compara con otro sistema que consume más combustible para generar el mismo producto. Cuando se busca optimizar el sistema más eficiente con respecto a un sistema convencional, considerando la utilidad que se genera al incluir los ingresos, se nota que los objetivos de utilidad (termoeconómico) y tecnológico (ahorro), unas veces pueden ser conflictivos, dependiendo de las condiciones de la calidad del combustible, tal como se muestra en la Figura 3.6; a medida que aumenta la utilidad, el ahorro toma valores diferentes; esto ocurre cuando se hacen variaciones en la composición de una mezcla de combustibles de diferentes calidades utilizados para producir una cantidad determinada de exergía.

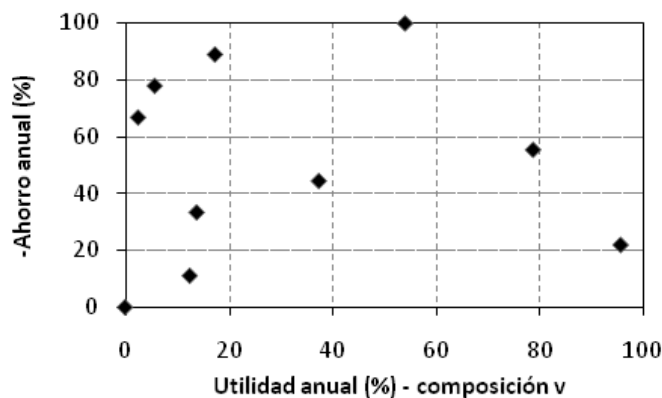


Figura 3.6. Utilidad contra ahorro a composición de combustible variable

En la Figura 3.7, se muestra dos casos donde no hay ahorro al utilizar una tecnología con respecto a otra convencional, incluso en el caso de la Figura 3.7b, es mejor utilizar la tecnología convencional que muestra un ahorro frente a la tecnología nueva. En primer lugar, lo que diferencia la tecnología nueva de la convencional, son los costos fijos, siendo menores los de la tecnología convencional y por ende una eficiencia exergética por debajo a la tecnología nueva. Estos costos fijos en la tecnología nueva se compensan con los costos variables, los cuales están formados fundamentalmente por los costos de combustible, es decir, que al utilizar una tecnología nueva, se invierte más en equipos, pero la cantidad de combustible utilizado es menor (menor pendiente de los costos variables), para producir la misma cantidad de exergía que un sistema convencional. En estos casos, a pesar que la pendiente de los costos variables del sistema más eficiente, es menor que la del sistema convencional no se puede tener un ahorro representativo debido a dos situaciones particulares: a) que la calidad y el costo del combustible sean tan bajos que la pendiente de los costos variables del sistema convencional no pueda ser interceptado por la pendiente del sistema nuevo y b) que los costos fijos del sistema nuevo sean tan altos para la producción de cierta cantidad mínima de exergía; si se proyectara el eje de la exergía del producto hacia la derecha en las Figuras 3.7a y 3.7b, las pendientes se interceptaran en un punto y de ahí en adelante se produciría el ahorro al utilizar el sistema nuevo.

A pesar que las condiciones normales sean las contempladas en la Figura 3.5, los casos de las Figuras 3.7a y 3.7b pueden ocurrir debido a las condiciones del entorno; es decir que al tener un sistema eficiente sólo haya disponible combustible de baja calidad o la demanda de exergía esté por debajo de las expectativas para la inversión en el sistema eficiente. Con esto se concluye que el objetivo termoeconómico y tecnológico no son redundantes cuando se consideran aspectos del entorno del sistema.

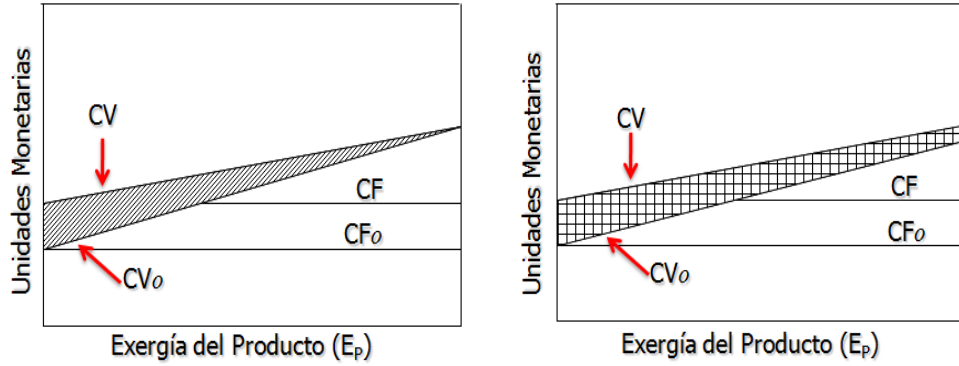


Figura 3.7. Evaluación del objetivo tecnológico

- Minimizar el impacto ambiental generado por los residuos, productos del proceso de transformación de energía. Esta función objetivo es importante porque regula los valores óptimos de las anteriores funciones objetivo, maximizar la utilidad y el ahorro; debido a que está influenciada directamente por la calidad y el precio de los combustibles utilizados.

3.3 ANÁLISIS MO AL SISTEMA INTEGRADO

Antes de evaluar el comportamiento de los objetivos para el sistema energético, se hace el correspondiente análisis exergético del subsistema II, teniendo en cuenta que el subsistema I ha sido ampliamente evaluado por varios autores (Sahoo, 2007), para este caso se toman los datos del problema resuelto por Sahoo del subsistema I, y algunas referencias para obtener los valores necesarios para el subsistema II (NETL, 2005). La integración de estos dos sistemas se debe a que el subsistema I, requiere ser alimentado por un gas, el cual es suministrado por el subsistema II a partir de la mezcla de carbones, siendo esta integración o IGCC (integración de un ciclo combinado con gasificación) uno de los sistemas energéticos más estudiados actualmente. Los valores del análisis exergético del subsistema II, se muestran en la Tabla (3.1), que complementan los obtenidos por Sahoo en el subsistema I. En la Tabla, las columnas identifican las propiedades termodinámicas de cada corriente (SP) del sistema, el flujo másico (m), la temperatura T , la presión P , la entalpía h , la entropía s , la exergía física \dot{E}_{PH} , la exergía química \dot{E}_{CH} y la exergía total \dot{E} .

Las ecuaciones para el análisis MO, requieren de varios parámetros consignados en la Tabla 3.2. Los valores de β , γ , β_o y γ_o , se tomaron del ejemplo planteado por Tsatsaronis y Pisa (1993); los valores de ω , ω_o , R y R_o , fueron asumidos inicialmente y posteriormente evaluados para diferentes cambios en las variables; los valores de B , B_o , m , m_o , n y n_o se evaluaron para dos condiciones de operación del sistema integrado, aplicando un algoritmo de búsqueda y las recomendaciones de Bejan et al. (Bejan et al., 1996).

El análisis consiste en evaluar el comportamiento de las ecuaciones con respecto a algunas variables, considerando lo siguiente:

Tabla 3.1. Propiedades de estado y exergía del sistema correspondiente a la Figura 3.1. (Sahoo, 2007).

SP	\dot{m}_T (kg/s)	T (K)	P (bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kgK)	\dot{E}_{PH} (MW)	\dot{E}_{CH} (MW)	\dot{E} (MW)
1	73,83	298,1	1,01	-164,5	6,7844	0,0	0,0	0,0
2	73,83	515,8	10,13	60,5	6,8520	19,7	0,0	19,7
3	98,79	1.500,0	9,62	-83,3	8,3686	108,3	0,1	108,4
4	98,79	1.002,5	1,13	-721,9	8,4865	41,7	0,1	41,9
5	98,79	726,8	1,07	-1.054,6	8,1141	19,8	0,1	20,0
6	98,79	598,0	1,02	-1.203,8	7,9034	11,3	0,1	11,4
7	15,00	298,1	1,01	104,9	0,3672	0,0	0,0	0,0
8	15,00	299,6	50,00	115,6	0,3864	0,1	0,0	0,1
9	15,00	525,8	49,00	1.098,2	2,8151	4,0	0,0	4,0
10	15,00	710,3	82,02	3.289,4	6,7999	19,0	0,0	19,0
11	15,00	400,6	2,50	2.716,5	7,0525	9,3	0,0	9,3
12	24,93	298,1	10,13	-4.672,8	2,1875	0,0	127,5	127,5
18	21,40	547,0	28,75	-978,4	7,0108	8,4	0,0	8,4
19	6,11	298,1	1,01	28.337,7	0,0000	0,0	173,1	173,1
20	2,57	450,0	1,01	22.623,7	5,4077	54,0	0,0	54,0

- El gas natural de la corriente 12 de la Figura 3.3, en el análisis de Sahoo, es reemplazado por gas sintético obtenido del gasificador (subsistema II).
- La cantidad de exergía de la corriente 12, permanece constante e igual a la aportada por el gas natural, los otros flujos de la misma corriente y de las corrientes 18, 19 y 20 dependen del flujo de exergía de la corriente 12.
- El sistema a evaluar es el sistema integrado (SI), con respecto a un sistema convencional (subsistema I). Para ello, se identificaron las variables y parámetros del subsistema I, con un subíndice o , indicando que este es el sistema convencional.

Tabla 3.2. Parámetros requeridos por los objetivos del problema

Parámetro	β	β_o	γ	γ_o	B	B_o	m	m_o	n	n_o
Valor	0.182		1.092		19.2E3	180	0.47	1.06	0.29	0.32
Referencia	(Bejan et al., 1996)		(Bejan et al., 1996)		(Bejan et al., 1996; Sahoo, 2007; Tsatsaronis et al., 1994)		(Bejan et al., 1996; Sahoo, 2007; Tsatsaronis et al., 1994)		(Bejan et al., 1996; Sahoo, 2007; Tsatsaronis et al., 1994)	

3.3.1 Aplicación de los Algoritmos Evolutivos

La presencia de múltiples objetivos en un problema, además de requerir de un método de resolución no convencional, da lugar a un grupo de soluciones óptimas conocidas ampliamente como soluciones óptimas de Pareto (Smith et al., 2000)

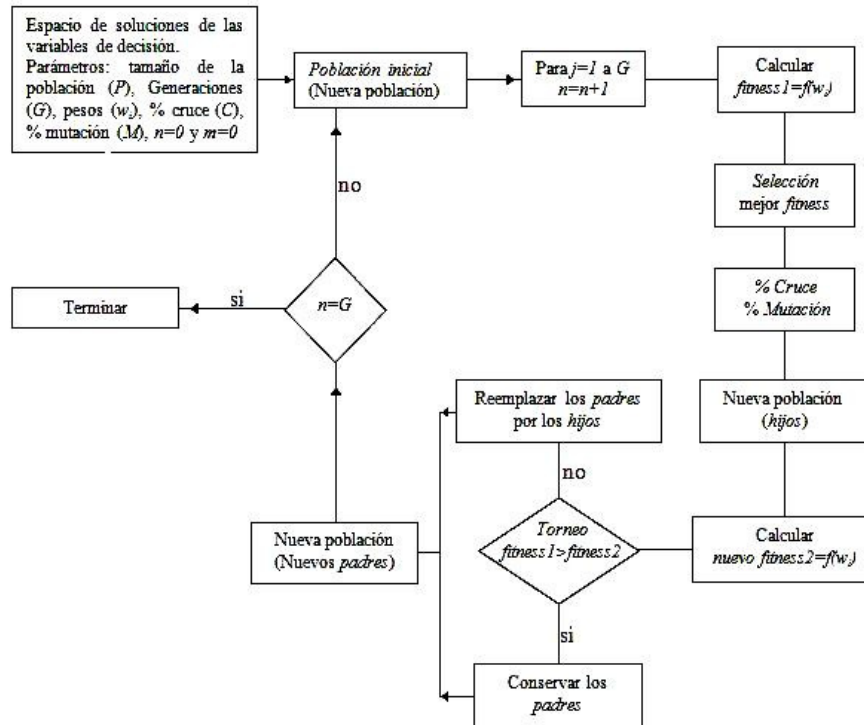


Figura 3.8. Diagrama de flujo del AG aplicando ponderación lineal

Los métodos evolutivos como la programación evolutiva, las estrategias evolutivas y los algoritmos genéticos (AG) son los más utilizados para estos casos debido a que tienen la ventaja de aplicar en modelos de alta complejidad que difícilmente tienen solución con metodologías matemáticas convencionales, porque pueden evaluar infinitas soluciones óptimas. En lo particular empleamos AG, con el que se construye el grupo de soluciones óptimas a partir de la asignación de diferentes conjuntos de pesos de importancia para cada función objetivo. En la Figura 3.8, se muestra el diagrama de flujo del algoritmo genético por pesos, en el que se identifican cada paso requerido para que se alcance la optimización para el caso particular.

Los AG's son una representación simple de la evolución biológica, en la que un par de padres de una población de individuos demarcados en una generación (selección), dan origen a un par de hijos con características de los padres (cruzamiento). Los individuos que forman la próxima generación se escogen por torneo, en el que gana el que tenga mejor aptitud (fitness) con base en los criterios del evaluador, con lo que la optimización va evolucionando hacia mejores valores en las próximas generaciones. Antes de la evaluación del fitness, se estima un porcentaje pequeño de mutación con el que hay un probable cambio de alguna característica del individuo.

En este caso, la función de aptitud (fitness) está constituido por la suma ponderada de los objetivos a los cuales se les asigna un peso según la preferencia del evaluador, tal como se representa en la Ec. 3.17.

$$Fitness = U \cdot w_1 + (-Ah) \cdot w_2 - m_z \cdot w_3$$

Donde $w_1 + w_2 + w_3 = 1$, es la suma de los pesos asignados a cada objetivo.

Una vez calculados las funciones objetivo, se puede determinar los costos exergéticos unitarios de cada una de las corrientes y las eficiencias de los equipos. Esto permite determinar las zonas de mayores pérdidas de flujo monetario y de exergía. Para esto se emplea la metodología F-P-R (Lozano y Valero, 1993; Tsatsaronis, 1993; Lazzaretto y Tsatsaronis, 2006), en la cual tiene tres pasos fundamentales para luego aplicar el F-principio y el P-principios. Esta metodología tiene como finalidad establecer los costos exergéticos unitarios de cada corriente del sistema con el fin de establecer donde se genera la mayor pérdida económica y exergética; para ello se siguen los siguientes pasos: a) determinar las corrientes de exergía de recurso y producto de cada equipo del sistema y hacer los balance totales de exergía para encontrar la exergía residual; b) determinar los costos exergético unitarios a través de balances de costos, con lo que se obtienen tantas ecuaciones como equipos existan, pero generalmente, hay más corrientes que equipos, por lo tanto se sigue el paso c) aplicar el F-principio y el P-principio para completar las ecuaciones y resolver el sistema de ecuaciones lineales. El F y P principios está estudiado detalladamente por Sierra y Valero (2001) con la teoría estructural del costo exergético y Tsatsaronis (2006) con la aplicación a los ingresos por exergía producida.

3.3.2 Análisis y Evaluación Exergoeconómica

Por lo general hay mayor cantidad de variables (corrientes) que ecuaciones, insuficientes para completar un sistemas de ecuaciones lineales, por lo tanto se acuden a las reglas de asignación (Valero, 1993) o los mismos argumentos de la metodología F-P-R (Tsatsaronis, 1993). Las ecuaciones para cada equipo se obtienen de los balances de flujos de costos en los cuales el flujo de costos del producto (\dot{C}_p) en cada equipo es igual a la suma del flujo de costos del recurso (\dot{C}_r) y el flujo de costos de cada equipo (\dot{Z}). Las ecuaciones generadas son las siguientes donde los subíndices numéricos de cada costo de recurso o producto corresponden a la identificación de cada una de las corrientes del sistema:

Compresor de aire (CA):

$$\dot{C}_2 = \dot{C}_1 + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{CA} \quad (3.18)$$

Cámara de combustión:

$$\dot{C}_3 = \dot{C}_2 + \dot{C}_{12} + \dot{Z}_{CC} \quad (3.19)$$

Turbina de gas:

$$\dot{C}_4 + \dot{C}_{14} = \dot{C}_3 + \dot{Z}_{TG} \quad (3.20)$$

$$\frac{\dot{C}_4}{\dot{E}_4} = \frac{\dot{C}_3}{\dot{E}_3}$$

Recuperador de calor y generador de vapor (RCGV) caso evaporador:

$$\dot{C}_5 + \dot{C}_{10} = \dot{C}_4 + \dot{C}_9 + \dot{Z}_{EV} \quad (3.21)$$

$$\frac{\dot{C}_4}{\dot{E}_4} = \frac{\dot{C}_5}{\dot{E}_5}$$

Recuperador de calor y generador de vapor (RCGV) caso economizador:

$$\dot{C}_6 + \dot{C}_9 = \dot{C}_5 + \dot{C}_8 + \dot{Z}_{EC} \quad (3.22)$$

$$\frac{\dot{C}_6}{\dot{E}_6} = \frac{\dot{C}_5}{\dot{E}_5}$$

Turbina de vapor:

$$\dot{C}_{11} + \dot{C}_{12} = \dot{C}_{10} + \dot{Z}_{TV} \quad (3.23)$$

$$\frac{\dot{C}_{11}}{\dot{E}_{11}} = \frac{\dot{C}_{10}}{\dot{E}_{10}}$$

Bomba:

$$\dot{C}_8 = \dot{C}_7 + \dot{C}_{17} + \dot{Z}_B \quad (3.24)$$

Gasificador:

$$\dot{C}_{20} + \dot{C}_{12} = \dot{C}_{19} + \dot{C}_{18} + \dot{Z}_G \quad (3.25)$$

Las ecuaciones auxiliares en 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23 se generan por las reglas de asignación en la que se explica que el costo exergético unitario de una corriente de salida es igual al costo exergético unitario de una corriente de entrada, si la corriente de salida proviene de la corriente de entrada en un proceso en el que parte de la exergía de la corriente de entrada es utilizada (Tsatsaronis, 2006). En caso que se requiera exergía adicional en la corriente de entrada, para formar una corriente de salida con mayor exergía estas corrientes no tendrían el mismo costo exergético unitario, incluso si la corriente de salida proviene de la corriente de entrada. Otras consideraciones a tener en cuenta son las siguientes:

- $\dot{C}_1 = \dot{C}_7 = \dot{C}_{20} = \dot{C}_{18} = 0$; porque son recursos tomados gratuitamente del entorno para el caso del agua/aire y productos que no tienen ningún costo

para el caso de las escorias o cenizas (Tsatsaronis, 2006; Sierra y Valero, 2001).

- A pesar que se tienen valores conocidos de los flujos de costos de algunas corrientes, hay 12 ecuaciones para 14 incógnitas, por lo tanto se generan las ecuaciones restantes a partir de otra regla de asignación que manifiesta que si hay varias corrientes con la misma calidad exergética, entonces todas estas tienen el mismo costo exergético unitario. Esta regla es aplicable claramente a las corrientes de potencia, con lo que se obtienen las ecuaciones auxiliares:

$$c_{14} = c_{13} \quad \text{o} \quad \frac{\dot{C}_{14}}{\dot{E}_{14}} = \frac{\dot{C}_{13}}{\dot{E}_{13}}$$

$$c_{17} = c_{13} \quad \text{o} \quad \frac{\dot{C}_{17}}{\dot{E}_{17}} = \frac{\dot{C}_{13}}{\dot{E}_{13}}$$

La principal dificultad del método convencional, ocurre cuando una vez se optimiza con el modelo económico (restricciones físicas en los equipos), se hace necesario establecer los valores de exergía de cada una de las corrientes de entrada y salida en cada equipo y sus eficiencias exergéticas para el caso óptimo. Una forma de evitar la complejidad en la escogencia de los flujos de exergía en cada corriente del sistema a través de rigurosos programas computacionales, es tomar como restricciones directamente a los flujos de exergía optimizando con un modelo exergoeconómico obtenido de la ecuación termoeconómica en cada equipo, tal como queda expresado con las Ecs. 3.26 a 3.33.

Compresor de aire (CA):

$$\dot{Z}_{CA} = B_{CA} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{CA}}{1 - \varepsilon_{CA}} \right)^{n_{CA}} \cdot \dot{E}_2^{m_{CA}} \quad (3.26)$$

Cámara de combustión:

$$\dot{Z}_{CC} = B_{CC} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{CC}}{1 - \varepsilon_{CC}} \right)^{n_{CC}} \cdot \dot{E}_3^{m_{CC}} \quad (3.27)$$

Turbina de gas:

$$\dot{Z}_{TG} = B_{TG} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{TG}}{1 - \varepsilon_{TG}} \right)^{n_T} \cdot \dot{E}_{14}^{m_{TG}} \quad (3.28)$$

Recuperador de calor y generador de vapor (RCGV) caso evaporador:

$$\dot{Z}_{EV} = B_{EV} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{EV}}{1 - \varepsilon_{EV}} \right)^{n_{EV}} \cdot (\dot{E}_{10} - \dot{E}_9)^{m_{EV}} \quad (3.29)$$

Recuperador de calor y generador de vapor (RCGV) caso economizador:

$$\dot{Z}_{EC} = B_{EC} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{EC}}{1 - \varepsilon_{EC}} \right)^{n_{EC}} \cdot (\dot{E}_9 - \dot{E}_8)^{m_{EC}} \quad (3.30)$$

Turbina de vapor:

$$\dot{Z}_{TV} = B_{TV} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{TV}}{1 - \varepsilon_{TV}} \right)^{n_{TV}} \cdot (\dot{E}_{11} + \dot{E}_{15})^{m_{TV}} \quad (3.31)$$

Bomba:

$$\dot{Z}_B = B_B \cdot \left(\frac{\varepsilon_B}{1 - \varepsilon_B} \right)^{n_B} \cdot \dot{E}_8^{m_B} \quad (3.32)$$

Gasificador:

$$\dot{Z}_G = B_G \cdot \left(\frac{\varepsilon_G}{1 - \varepsilon_G} \right)^{n_G} \cdot \dot{E}_{12}^{m_G} \quad (3.33)$$

Las restricciones para estas ecuaciones se obtienen a partir de las restricciones iniciales del modelo físico y del modelo económico. Los valores de las exergías, se pueden calcular con un sistema de ecuaciones lineales provenientes de las expresiones de recurso y producto para cada equipo señaladas en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Definición de recurso (F) – producto (P) – residuo (R) para el sistema de la figura. (Sahoo, 2007)

Equipos	Recurso (MW)	Producto (MW)	Eficiencia
Compresor de aire	\dot{E}_{13}	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	$(\dot{E}_2 - \dot{E}_1)/\dot{E}_{13}$
Cámara de combustión	$\dot{E}_2 + \dot{E}_{12}$	\dot{E}_3	$\dot{E}_3/(\dot{E}_2 + \dot{E}_{12})$
Turbina de gas	$\dot{E}_3 - \dot{E}_4$	\dot{E}_{14}	$\dot{E}_{14}/(\dot{E}_3 - \dot{E}_4)$
RCGV _{EV}	$\dot{E}_4 - \dot{E}_5$	$\dot{E}_{10} - \dot{E}_9$	$(\dot{E}_{10} - \dot{E}_9)/(\dot{E}_4 - \dot{E}_5)$
RCGV _{EC}	$\dot{E}_5 - \dot{E}_6$	$\dot{E}_9 - \dot{E}_8$	$(\dot{E}_9 - \dot{E}_8)/(\dot{E}_5 - \dot{E}_6)$
Bomba	$\dot{E}_7 + \dot{E}_{16}$	\dot{E}_8	$\dot{E}_8/(\dot{E}_7 + \dot{E}_{16})$
Turbina de vapor	\dot{E}_{10}	$\dot{E}_{11} + \dot{E}_{15}$	$(\dot{E}_{11} + \dot{E}_{15})/\dot{E}_{10}$
Gasificador	\dot{E}_{19}	\dot{E}_{12}	$\dot{E}_{12}/\dot{E}_{19}$
Sistema completo	\dot{E}_{19}	$50 + \dot{E}_{11}$	$(\dot{E}_{11} + 50)/\dot{E}_{19}$

Con la Tabla 3.3 se tienen 9 ecuaciones con 16 incógnitas, es decir, que faltarían 7 ecuaciones adicionales para completar el sistema de ecuaciones lineales. Las ecuaciones restantes, se obtienen a partir de las nuevas variables de decisión cuyo rango de valores probables se toman de la amplitud de valores posibles para las

variables físicas con referencia al modelo económico. El rango admisible de los valores nominales en las variables de decisión son los siguientes:

Relación de compresión en el compresor de aire $\rightarrow 9 \leq r_p (P_2/P_1) \leq 15$

Eficiencia isentrópica del compresor de aire $\rightarrow 0.75 \leq \eta_{CA} \leq 0.90$

Temperatura a la salida de la cámara de combustión $\rightarrow 1450 \leq T_3 \leq 1550$

Eficiencia isentrópica de la turbina de gas $\rightarrow 0.75 \leq \eta_{TG} \leq 0.92$

Eficiencia isentrópica de la turbina de vapor $\rightarrow 0.75 \leq \eta_{TV} \leq 0.92$

Presión de vapor de entrada en la turbina de vapor $\rightarrow 30 \leq P_{10} \leq 75$

Eficiencia de la bomba $\rightarrow 0.75 \leq \eta_B \leq 0.90$

Los valores anteriores son requeridos para el modelo económico, a partir de los cuales se pueden generar los rangos de las variables de decisión para el modelo exergoeconómico representados por las eficiencias exergéticas de cada uno de los equipos y la exergía de las corrientes 2, 3, 8, 9, 10, 14 y 15. Con los datos de la variable de decisión del modelo exergoeconómico, se alimenta el sistema para determinar las exergías de cada corriente para calcular las funciones objetivo, hasta alcanzar el óptimo con el algoritmo genético y finalmente, con el óptimo calculado, se obtienen los datos de los costos exergéticos unitarios de cada corriente. La estructura del proceso se puede observar en la Figura 3.9, en la que se muestra el algoritmo genético con la inclusión de la evaluación de la matriz de exergías.

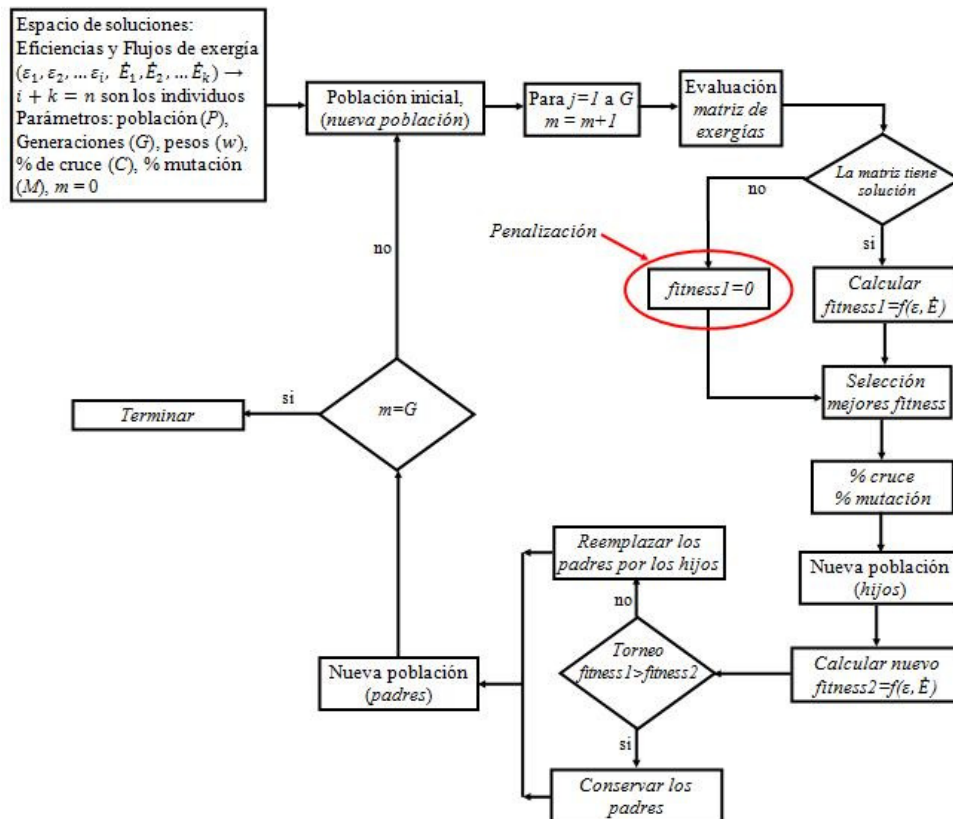


Figura 3.9. Algoritmo genético con evaluación de matriz de exergía

Nótese que el algoritmo representado en la Figura 3.9, tiene un paso de penalización, el cual se presenta cuando los individuos que alimentan la matriz de exergías no generan una solución lógica, asignándoles un valor de fitness bajo para que no sea escogido entre los mejores.

Finalmente se calculan los valores de B , n y m para cada equipo siguiendo los requerimientos de Tsatsaronis (1994) y las recomendaciones del capítulo 2, los cuales se relacionan en la Tabla 3.4

Tabla 3.4. Valores B , n y m para las Ecs. 3.26 a 3.32.

Equipos	B	n	m
Compresor de aire	3.77	1.39	0.12
Cámara de combustión	0.20	0.10	$0.011 * \dot{E}_p - 0.35$
Turbina de gas	0.07	1.30	$0.923 * \dot{E}_p - 2.98$
RCGV _{EV}	5.03	0.99	0.32
RCGV _{EC}	78.28	0.05	0.16
Bomba	0.61	0.38	0.21
Turbina de vapor	0.43	2.19	0.45
Planta completa	5.26	0.32	1.06

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se clasifican entre los que son generados por el análisis multiobjetivo, que tienen relación con la parte externa del sistema y los generados por ecuaciones de inversión para cada equipo que conforman el sistema, los cuales tienen relación con la parte interna del sistema.

3.4.1 Resultados Debido al Análisis Multiobjetivo

El análisis MO permite establecer relaciones entre características provenientes del entorno del sistema para los diferentes objetivos de interés del evaluador. Para el caso del comportamiento del objetivo tecnológico en función del termoeconómico, se muestra que hay una dependencia por la influencia de la composición del combustible. La Figura 3.10a, muestra que cuando la composición del combustible es constante (un solo combustible), hay un marcado comportamiento inverso entre las funciones objetivo consideradas, pero sobre todo con una tendencia lineal. Cuando la composición de combustible es variable (mezcla de varios combustibles con distintas calidades), este comportamiento no es claro, presentándose algunas veces comportamiento directo (colaborador) y otras veces comportamiento inverso (contradictor) con una relación diferente a la esperada entre estas funciones objetivo, tal como se muestra la Figura 3.10b. Para todos los puntos evaluados, se considera que la exergía producida es constante sin incertidumbre, presentándose los cambios solamente en el combustible y en la eficiencia del sistema.

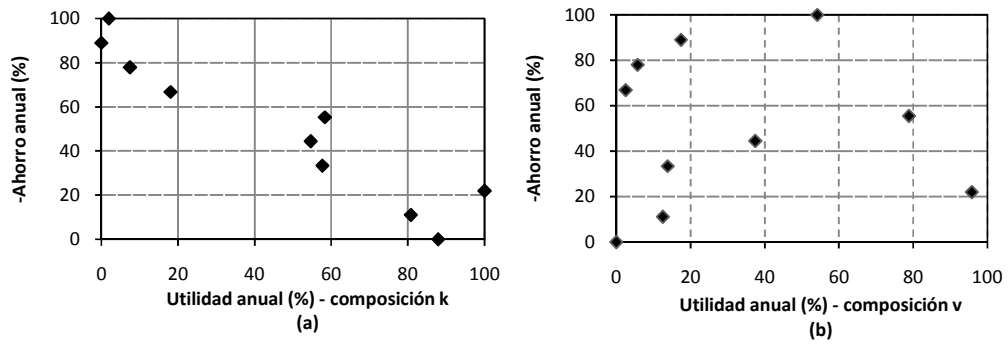


Figura 3.10. Utilidad contra ahorro a composición de combustible (a) constante y (b) variable

La Figura 3.11a, muestra que el objetivo ambiental es linealmente contradictorio al tecnológico, es decir, que estos objetivos son inversamente proporcionales y por lo tanto se pueden alcanzar mejores ahorros a expensas de utilizar combustibles de baja calidad independiente de la utilidad generada. Por esta razón, es necesario establecer la distribución de costos del sistema; se muestra claramente en la Figura 3.11b, que el objetivo termoeconómico (utilidad) es afectado por la distribución de costos, por un lado es inversamente proporcional a los costos de combustibles, pero directamente proporcional a los costos de inversión y O&M para una mezcla de dos combustibles, uno de baja calidad y precio bajo y otro de buena calidad y precio mayor, lo que explica que los puntos de la figura sean lineales. A medida que se invierte en combustibles de baja calidad, se incrementa los costos de operación y mantenimiento aunque se alcance mayores utilidades, tal como se aprecia en la Figura 3.12b; esto puede desacelerar el tiempo de vida del equipo o sistema, por lo tanto, se recomienda utilizar combustibles de buena calidad para disminuir el costo de operación y mantenimiento. Con esto se evidencia que los combustibles de buena calidad elevan la eficiencia del equipo y así las variables del entorno afectan el funcionamiento del sistema.

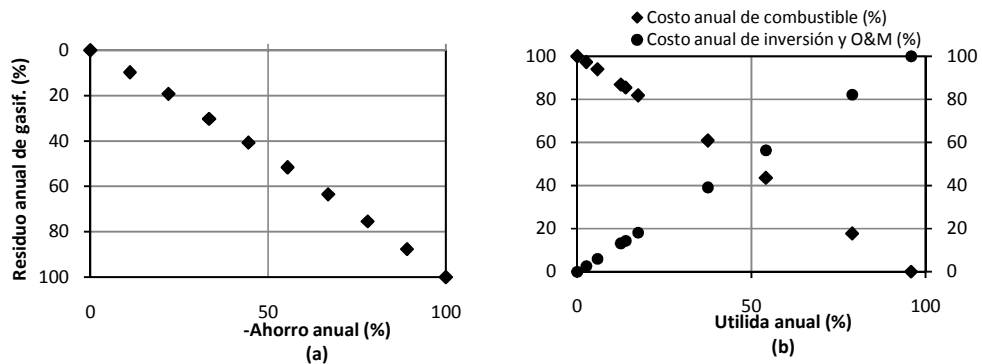


Figura 3.11. a) Ahorro contra producción de residuos. b) Utilidad contra costos de combustible - de inversión y O&M

La Figura 3.12, obtenida de la optimización aplicando los pasos del diagrama de algoritmos evolutivos (AE) de la Figura 3.9 y aplicando la Ec. 3.17, muestra la influencia de pesos de importancia para elegir un óptimo cuando se tienen varios

objetivos. Para este caso se fijaron 100 individuos en la población inicial, 200 generaciones, un porcentaje de mutación del 5% y un porcentaje de cruce del 85%. Con estos parámetros, el comportamiento del algoritmo evolutivo depende de la asignación de pesos para cada objetivo, por ejemplo, en la primera corrida representada por un rombo, el objetivo termoeconómico (Te) tiene un peso de 10%, el objetivo tecnológico (T) 40% y el objetivo ambiental (A) 50%, solo hay un desarrollo del fitness (suma algebraica de los objetivos) de 80%. En este sentido, el fitness que tiene peor desarrollo se presenta cuando se asigna 40% al objetivo termoeconómico y 50% al objetivo ambiental, mientras que alcanza el 100% de su desarrollo cuando se asigna 50% al objetivo tecnológico, acompañado de un 10% del objetivo ambiental y 40% del objetivo termoeconómico o viceversa. Lo más relevante que se muestra en la Figura, es la influencia del objetivo ambiental en los otros objetivos y la predominancia del objetivo tecnológico. Cuando se le asigna un peso alto al objetivo ambiental, se observa que los objetivos termoeconómico y tecnológico se afectan, en algunos casos considerablemente.

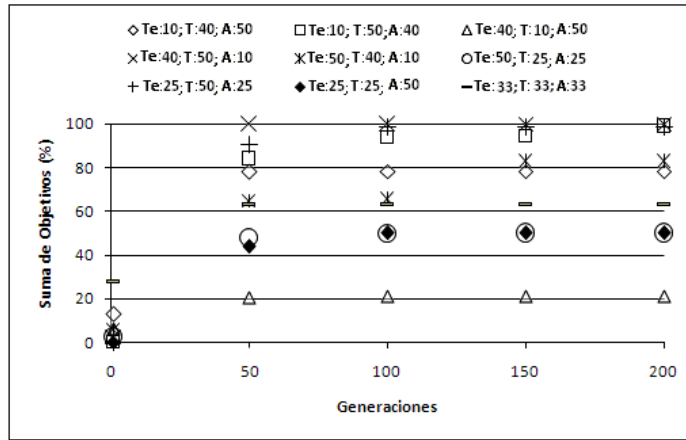


Figura 3.12. Generaciones de optimización con pesos

Cuando el objetivo ambiental se le da un peso de 50, el objetivo global no supera el 80%; la curva más alta se obtiene cuando el objetivo tecnológico se le asigna un valor de 40. Si observamos las curvas cuando el objetivo tecnológico tiene peso 50, se obtienen los valores globales más altos, lo que indica que este objetivo predomina sobre los otros, lo que requiere de la normalización de las funciones objetivo con la Ec. 3.34, donde F es la función objetivo normalizada i , V es el valor real de la función objetivo i y V_{max} y V_{min} , son los valores máximos y mínimos que puede alcanzar la función objetivo i , respectivamente.

$$F_i = \frac{V_i - V_{min,i}}{V_{max,i} - V_{min,i}}$$

La Figura 3.14, muestra la influencia de los pesos en la optimización del problema MO con AE, en el que se configura la frontera Pareto-óptima a partir de la obtención del fitness. Tal como se explicó anteriormente, el objetivo ambiental condiciona los otros objetivos. El mejor valor se muestra cuando los pesos son de

25 para el objetivo termoeconómico, 50 para el tecnológico y 25 para el ambiental, donde se obtiene valores medios para cada objetivo

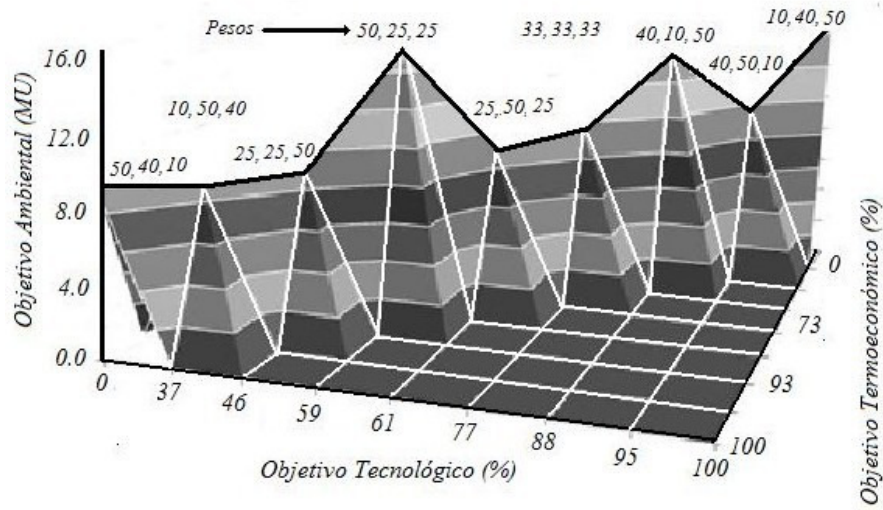


Figura 3.13. Curva de Óptimos de Pareto a partir de pesos

La Figura 3.13, que contorna la frontera de óptimos de Pareto para nueve puntos en la que cada objetivo hace parte de los ejes X, Y e Z de un sistema en 3D. El objetivo termoeconómico (utilidad) corresponde al eje de profundidad, el objetivo tecnológico (ahorro) corresponde al eje horizontal y el objetivo ambiental (residuos) corresponde al eje vertical; los pesos están entonces ubicados con respecto al orden anterior, de tal manera que los pesos (50, 40, 10) están fijados al objetivo termoeconómico, tecnológico y ambiental respectivamente. Los mejores valores del objetivo termoeconómico se encuentran cuando se asignan pesos mayores para este objetivo ubicado al extremo izquierdo de la curva de óptimos, sin embargo, hay un punto de la frontera en la que el objetivo termoeconómico tiene un buen valor, a pesar que se le asigna un 10% de peso. Los mejores valores del objetivo tecnológico están en el extremo derecho de la curva de óptimos, en los cuales se asignan pesos altos, entre el 50 y el 40%. Para el objetivo ambiental los mejores puntos son los valles de la curva de óptimos, en los cuales hay algunos que con valores altos y están ubicados del lado de los valles, no obstante, hay algunos puntos que con asignaciones porcentuales bajas también están ubicados en los valles. Los casos atípicos se deben a que el algoritmo a pesar que tiene pesos para cada objetivo, tiene prioridad los mejores valores en el fitness.

3.4.2 Resultados debido a partir del análisis por equipos con la ecuación termoeconómica.

La ecuación termoeconómica por equipos hace referencia a las condiciones internas del sistema debido a la interconexión entre uno y otro, cuando esta ecuación se utiliza globalmente, puede hacerse análisis como los planteados anteriormente en el que se involucran aspectos del entorno del sistema. En el análisis por equipos, el de la metodología de los algoritmos evolutivos también es importante debido a la gran cantidad de variables que pueden intervenir en la evaluación y a la capacidad de que tienen los algoritmos híbridos para solucionar

este tipo de problemas (Padilha et al., 2009). En esta metodología, a diferencia de la convencional, se pueden integrar al AG dos operaciones de matrices para resolver sistemas de ecuaciones lineales. La primera matriz a tener en cuenta es la que denominamos anteriormente matriz de exergías, la cual proviene de las ecuaciones relacionadas en la Tabla 3.3, representada con el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{array}{cccccccccccccccc|cccc|c|c}
 -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{CA} & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_1 & 0 \\
 0 & -\varepsilon_{CC} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{CC} & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_2 & 0 \\
 0 & 0 & -\varepsilon_{TG} & \varepsilon_{TG} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dot{E}_3 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{EV} & \varepsilon_{EV} & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_4 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{EC} & \varepsilon_{EC} & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_5 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_B & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_B & \dot{E}_6 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{TV} & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dot{E}_7 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_8 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_9 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_{10} & \dot{E}_2 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_{11} & \dot{E}_3 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_{12} & \dot{E}_8 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_{13} & \dot{E}_9 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{E}_{14} & \dot{E}_{10} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dot{E}_{15} & \dot{E}_{14} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dot{E}_{16} & \dot{E}_{15}
 \end{array}$$

La idea es establecer los valores de exergía apropiados para el sistema, teniendo en cuenta el rango de valores posibles de eficiencia exergética de cada equipo y de la exergía de alguna de las corrientes. Los valores de exergía son necesarios para alimentar el modelo exergoeconómico (Ecs 3.26 a 3.33) y obtener el mínimo costo exergético unitario del producto, el cual corresponde al fitness en función de las eficiencias exergéticas y la exergía de algunas de las corrientes. Con el valor óptimo del fitness, se puede calcular el costo exergético unitario de cada corriente con una segunda matriz que incluye las exergías y los costos asociados a cada corriente. Esta matriz ha sido ampliamente estudiada con la que se puede tener el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{array}{cccccccccccccccc|cccc|c|c}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_2 & \dot{Z}_{CA} \\
 -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_3 & \dot{Z}_{CC} \\
 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_4 & \dot{Z}_{TG} \\
 0 & -\dot{E}_4 & \dot{E}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_5 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_6 & \dot{Z}_{EV} \\
 0 & 0 & -\dot{E}_5 & \dot{E}_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_8 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_9 & \dot{Z}_{EC} \\
 0 & 0 & 0 & -\dot{E}_6 & \dot{E}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_{10} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dot{C}_{11} & \dot{Z}_{TV} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{E}_{11} & \dot{E}_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_{12} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & \dot{C}_{13} & \dot{Z}_B \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{E}_{14} & \dot{E}_{13} & 0 & 0 & 0 & \dot{C}_{14} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{E}_{15} & \dot{E}_{14} & 0 & 0 & \dot{C}_{15} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{E}_{16} & 0 & \dot{E}_{14} & 0 & \dot{C}_{16} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{E}_{17} & \dot{E}_{16} & \dot{C}_{17} & 0
 \end{array}$$

Los resultados provenientes de la evaluación de los algoritmos genéticos con matrices de exergía y el flujo de costos de cada corriente, se muestran en la Tabla 3.5., para pesos iguales en las funciones objetivo, para que pueda ser comparable con el método aplicado por Sahoo (2007).

Tabla 3.5. Costos de las corrientes del sistema

No.	Caso base		Óptimo de Sahoo		Óptimo calculado	
	\dot{C} (US\$/h)	$\frac{c}{centUS/kWh}$	\dot{C} (US\$/h)	$\frac{c}{centUS/kWh}$	\dot{C} (US\$/h)	$\frac{c}{centUS/kWh}$
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	958.99	4.87	1130.45	4.42	648.52	2.54
3	2981.02	2.75	2875.17	2.76	2359.30	2.26
4	680.31	1.62	547.23	1.72	731.65	2.30
5	324.73	1.62	195.45	1.72	272.40	2.30
6	185.10	1.62	72.12	1.72	111.21	2.30
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	2.92	2.92	4.12	3.27	3.25	2.58
9	238.83	5.97	227.88	5.22	264.88	6.07
10	620.87	3.27	619.98	3.08	764.43	3.80
11	303.90	3.27	286.38	3.08	531.50	3.80
12	2010.25	1.58	1735.63	1.58	1701.67	1.55
13	825.55	3.81	1042.20	3.60	560.28	2.59
14	2403.12	3.81	2485.34	3.60	1785.05	2.59
15	327.25	3.81	356.90	3.60	256.23	2.59
16	2.02	3.81	3.17	3.60	2.31	2.59

La Tabla 3.5 muestra los cambios presentados del caso base utilizado por Sahoo (2007) y los óptimos que encontró comparados con la evaluación del sistema a partir de la nueva metodología. Se observa que el costo del producto (corrientes 13, 14, 15 y 16), disminuye en aproximadamente un centavo de dólar por kWh en el óptimo calculado. Una de las razones por lo que esto se presenta es porque Sahoo tenía como función objetivo la minimización de los costos de exergía perdida y destruida, haciendo que su algoritmo de programación evolutiva tuviera preferencia por la eficiencia del sistema, mientras que en esta nueva metodología se conduce al algoritmo genético a minimizar el costo exergético unitario del producto, y eso es lo que se refleja en los resultados. De cualquier manera la disminución del costo exergético unitario del producto es asumido por un aumento en el costo exergético unitario de la corriente 9, la cual está por encima del óptimo de Sahoo (2007).

La anterior metodología, es una forma diferente de evaluar el sistema energético a lo que normalmente se propone, con la posibilidad de presentar relaciones entre el impacto ambiental y otras tecnologías disponibles. En el siguiente capítulo, se estudia con más detalle las funciones objetivo tecnológica y ambiental, modificadas con el fin de separar las funciones de eficiencia y costos de los productos, aplicados a un sistema de mayor complejidad que el estudiado en este capítulo en el entorno Colombiano.

RESUMEN

El término termoeconomía hizo su primera aparición en el año 1962 por Evans y Tribus, argumentando la necesidad de integrar aspectos termodinámicos con económicos para analizar sistemas energéticos a partir de criterios cercanos a la realidad (Chejne y Restrepo, 2003; Sahoo, 2007). Desde entonces la termoeconomía se ha afianzado notablemente, siendo utilizada como la teoría principal para el desarrollo de métodos de análisis de sistemas energéticos, como el SPECO (Lazzaretto y Tsatsaronis, 2006). Sin embargo, para la optimización de sistemas energéticos se han utilizado separadamente modelos físicos y económicos, por la dificultad de enlazar adecuadamente dichos modelos en una función única; al utilizar modelos termoeconómicos separados, el método de optimización empieza con establecer los límites de operación de las variables de decisión con base en el modelo físico, luego con el modelo económico se optimiza buscando el mínimo costo para condiciones dentro de los límites de las variables de decisión y finalmente se debe volver al modelo físico para balancear exergética y energéticamente el sistema. La última parte del método de optimización por modelos físicos y económicos separados es la más compleja debido a que se pueden presentar múltiples combinaciones de exergías en las corrientes internas del sistema. No obstante, existe un modelo de optimización termoeconómico integrado, el cual tiene ventajas marcadas dado que las eficiencias exergéticas hacen parte de las variables de decisión y con estas se obtienen las exergías de cada corriente al tiempo que ocurre la optimización, sin embargo, una de las debilidades principales que han limitado su uso es que solo se hace viable para un rango corto de las variables de decisión (ver sección anterior).

En esta sección se utiliza el modelo de optimización integrado en el que las variables de decisión operan entre límites establecidos por el modelo termoeconómico y el modelo físico, mientras que la optimización se hace a partir del modelo termoeconómico; en este caso no hay necesidad de balancear exergéticamente el sistema, debido a que este se logra simultáneamente con la optimización. El método propuesto muestra la posibilidad de incluir variables del entorno del modelo, rompiendo con el aislamiento termoeconómico a la vez de incluir varias funciones objetivo para optimizar, obteniendo resultados razonables.

CAPITULO 4.

OPTIMIZACIÓN TERMoeCONÓMICA, TECNOLÓGICA Y AMBIENTAL CON ALGORITMOS GENÉTICOS MULTIOBJETIVO

INTRODUCCIÓN

El problema MO en sistemas energéticos complejos, cuando es evaluado con sistemas de cálculo convencionales, conduce a valores óptimos locales, por lo tanto se han utilizado herramientas de búsqueda para determinar diferentes posibilidades de escogencia entre varios óptimos o que conduzcan a un óptimo global (Sahoo, 2007). Muchos problemas han sido formulados con un único objetivo en problemas de programación no lineales con una o varias restricciones, para resolverse mediante el uso de técnicas de programación matemática o heurística; estos problemas son reformulados como problemas de múltiples objetivo (MO) que pueden resolverse mediante técnicas de segunda generación que permite la manipulación de las restricciones (Salazar et al., 2008). Hasta ahora, las herramientas se han aplicado en la optimización de sistemas de conversión de energía, basada en los conceptos de la termodinámica y la economía incluyendo aspectos fundamentales para reducir el impacto ambiental (Meyer, et al., 2009); sin embargo, el análisis puede servir de complemento a la optimización MO, ya que permite incluir las variables externas a un sistema de energía complejo (Garduño et al., 2001; Galván et al., 2003), por lo que la teoría termoeconómica combinada con los algoritmos evolutivos, representa una herramienta muy poderosa para el estudio sistemático en la optimización de los sistemas energéticos. En este trabajo, se evalúa Termocesar como sistema convencional y se compara con un sistema optimizado con las mismas características, con posibilidades de interacción en diferentes escenarios colombianos que tienen en cuenta la calidad y costos de los combustibles (carbón) y la necesidad de utilizar mezclas de estos combustibles para satisfacer al máximo tres criterios de evaluación, que se encuentran en conflicto termoeconómico, tecnológico y ambiental.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO PARA EL ANÁLISIS MULTIOBJETIVO

Para describir el problema MO se parte de un sistema, como se muestra en la Figura 4.1. Este sistema, denominado Termocesar fue planeado teóricamente por entidades consultoras colombianas para generar 300 MW, como propuesta de generación eléctrica para suplir las crisis de verano en Colombia, con base en algunos requerimientos de entornos regionales, tales como la disponibilidad y calidad del carbón, el aprovisionamiento de agua de enfriamiento y condiciones adecuadas de vegetación para atenuar el impacto ambiental. El estudio reportó

como ubicación propicia de Termocesar, al municipio de Tamalameque (Cesar-Colombia) por estar relativamente cerca de la zona carbonífera de donde se extraen carbones de buena calidad térmica, contar con abundantes bosques y estar contiguo a la cuenca del río Cesar como abastecedor permanente de agua. Las características principales de Termocesar, son el uso de la energía del carbón, el sistema con tres etapas de repotenciación y el agua de enfriamiento

El análisis propuesto, incluye aspectos relacionados con las variables del entorno del sistema, con el fin de evaluar las condiciones del medio que afectan los recursos, los productos y los residuos, y a su vez evaluar cómo afectan estos al sistema de manera global. Por ejemplo, para el caso que el recurso sea carbón, habrá factores que condicionan el suministro, tales como la calidad, la disponibilidad, el precio, el tamaño y la ubicación del proveedor. De igual manera el precio, la calidad (electricidad/vapor) y la demanda son factores que condicionan el producto y la disposición final y/o el almacenamiento, condicionan los residuos. Se hace el análisis del sistema global, considerando tres aspectos de interés para evaluar: el desempeño termoeconómico, tecnológico y ambiental; lo que a su vez representan para el decisor, objetivos denominados con los mismos nombres. Un aspecto importante en el modelo, es incluir nuevas condiciones del entorno utilizando mezclas de carbones de diferentes regiones de Colombia; con esto se busca establecer si pueden emplearse otras regiones como factibles para la ubicación del sistema energético, sin incluir los precios de transporte debido a que se asume que el combustible de mayor proporción daría la mejor alternativa de ubicación del sistema.

4.1.1 Objetivo Termoeconómico

El análisis termoeconómico se ha centrado básicamente en establecer las implicaciones del costo exergético de las corrientes localizadas en un sistema energético a través de los costos asociados al recurso y los equipos que lo conforman, salvo algunas excepciones metodológicas como las desarrolladas por Paulus y Tsatsaronis (2006), que han incluido además los ingresos para el análisis. Con el modelo presentado, a través del objetivo termoeconómico, se incluye los ingresos obtenidos en un ambiente de certidumbre debido a las fluctuaciones del precio de la energía; aunque también se propone hacer el ejercicio con incertidumbre para esta variable en el capítulo 5. Con la inclusión del precio, se puede tener una aproximación de la capacidad real y potencial de ingresos, cuando el sistema está operando.

Para ello se considera que los ingresos potenciales, que podrían denominarse de mejor manera como beneficios potenciales, dependen del funcionamiento del sistema y de la venta del producto en el mercado, es decir, la primera parte de los ingresos depende del valor de la exergía en el mercado y la segunda parte reporta ingresos obtenidos de lo que se deja de pagar por la exergía perdida y destruida si el sistema operara en condiciones ideales, por lo tanto los ingresos potenciales quedarían representados por la siguiente ecuación:

$$\dot{R}e_{PT} = p_P \dot{E}_P + c_F (\dot{E}_L + \dot{E}_D) \quad (4.1)$$

Donde \dot{E}_P es el flujo de exergía de la corriente de producto, $\dot{E}_L + \dot{E}_D$ es la suma de los flujos de exergía perdida y destruida, respectivamente; p_P y c_F son el precio y el costo exergético unitario del producto y del recurso, respectivamente. El flujo de ingresos potenciales (\dot{R}_{ePT}) depende directamente de la exergía producida y el precio de la exergía en el mercado; pero también depende del estado del sistema, esto es de la cantidad de exergía perdida y destruida, debido a que sería el ingreso que se dejaría de recibir por el pago de la exergía no aprovechable.

Los ingresos reales, sería el producto por su precio en el mercado de la energía, con lo que el objetivo termoeconómico quedaría representado como la eficiencia potencial de ingresos; así:

$$\varepsilon_{PI} = \frac{1}{\left[1 + \frac{c_F}{p_P} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}\right)\right]} \quad (4.2)$$

La Ec. 4.2, se obtiene a partir de la relación de la eficiencia con las exergías, presentadas en la Ec. 4.3 (Bejan et al, 1996).

$$\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\dot{E}_L + \dot{E}_D}{\dot{E}_P} \quad (4.3)$$

En este caso el objetivo sería maximizar la eficiencia potencial de ingresos (ε_{PI}), con el que se quiere disminuir el costo debido a la exergía perdida y producida. Donde \dot{m}_T es el flujo másico total de combustible y $\sum X_i PC_i$ es el poder calorífico de las fracciones de mezcla de combustibles.

En este caso las fracciones de los combustibles son las variables de decisión. Las unidades de los flujos de exergía se dan en kW, los flujos de ingresos en US\$/s, los costos exergéticos unitarios en US\$/kJ, el flujo másico en kg/s y la eficiencia no tiene unidades.

4.1.2 Objetivo Tecnológico

La Figura 4.1 se compara con otra estructura más eficiente, la Figura 4.2, la cual se supone ocuparía el mismo entorno de Termocesar (mezclas de carbones de diferentes regiones de Colombia), produciendo 300 MW.

Teniendo las dos tecnologías, se puede establecer una diferencia de costos, con lo que se tiene el posible ahorro que permite utilizar una tecnología más eficiente que la convencional. El ahorro se puede representar con la Ec. 4.4.

$$-Ah^A = \tau \cdot c_F \left(\sum X_i PC_i \right) (\dot{m}_T - \dot{m}_{T,o}) + \Delta C_{CO} + \Delta C_{O\&M} \quad (4.4)$$

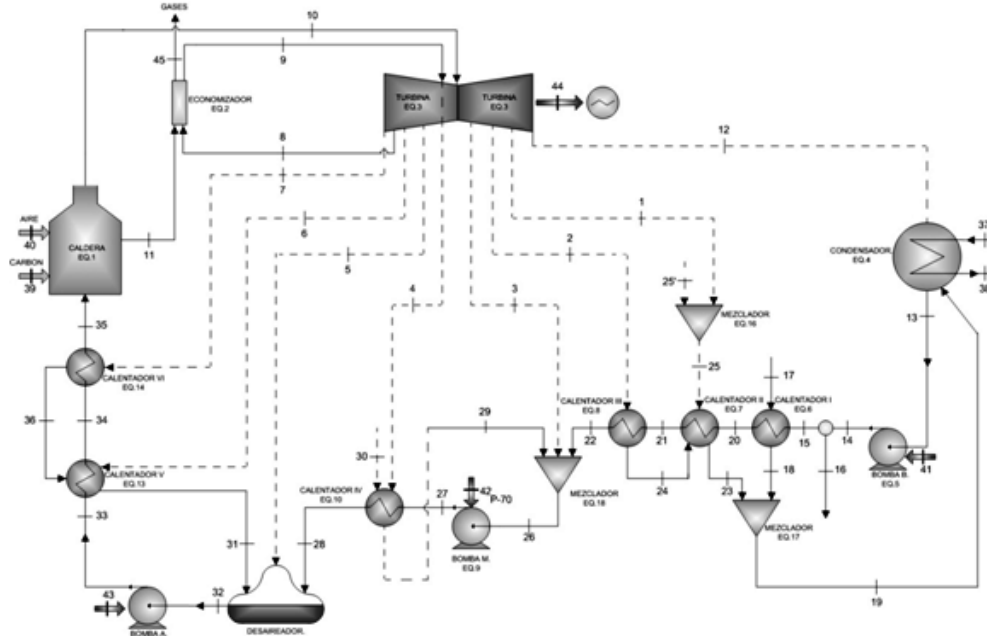


Fig. 4.1. Estructura de teórica de Termocesar para 300 MW

Donde los dos últimos factores de la Ec. 4.4, corresponde a la diferencia de los costos debido a las condiciones de operación del sistema energético (ΔC_{CO}) y la diferencia debido a los costos de operación y mantenimiento ($\Delta C_{O\&M}$). Las unidades de ahorro y diferencia de costos tanto en las condiciones de operación como en la operación y mantenimiento del sistema se da en US\$ para un año.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta C_{CO} = \dot{E}_P^m (\beta + \gamma) B \left[\frac{\dot{E}_P}{\dot{m}_T (\sum X_i P C_i) - \dot{E}_P} \right]^n \\ \quad - \dot{E}_P^{m_o} (\beta_o + \gamma_o) B_o \left[\frac{\dot{E}_P}{\dot{m}_{T,o} (\sum X_i P C_i) - \dot{E}_P} \right]^{n_o}, y \\ \Delta C_{O\&M} = \tau \cdot \dot{E}_P \cdot (\omega - \omega_o) + (R - R_o) \end{array} \right. \quad (4.5)$$

Donde el subíndice o, indica los valores de la tecnología convencional, τ es el tiempo de operación en horas durante un año (superíndice A). Las letras β , γ , ω y R corresponden a los costos de operación y mantenimiento constantes, el factor de recuperación, los costos de operación y mantenimiento variables y otros costos, respectivamente. Los factores B , m y n ; son constantes que hacen parte de la ecuación de inversión (Bejan et al., 1996), utilizada para optimización de sistemas energéticos a partir de criterios tecnológicos, tamaño o capacidad de los equipos y propiedades termodinámicas de las corrientes del sistema.



Tabla 4.1. Constantes de la ecuación 3.4 para SC y SCC

Parámetros	β	β_o	γ	γ_o	B	B_o	m	m_o	n	n_o
Valor	0.182		1.092		1.9E4	5.27	0.47	1.06	0.29	0.32

En la Tabla 4.2, se aprecia que los carbones de mayor poder calorífico proceden de las regiones de Santander, Cesar, Guajira, Antioquia y Boyacá; pero sólo en los carbones del Cesar y la Guajira, el contenido de cenizas es inferior al 9%, lo que hace que su costo sea alto comparado a los demás, entendiéndose que estos carbones sean apetecibles en el mercado internacional. Hay algunos trabajos donde se hace alusión a los combustibles y la relación existente con el impacto ambiental al momento de generar energía con ellos (Blanco y Peña, 2008; Borchellini et al. 2002; Boyd et al., 1995; Duan y Yang, 2007)

4.1.3 Objetivo Ambiental

Se establece como la cantidad másica de residuos sólidos o cenizas (Γ_z) que se generan por la combustión del carbón. En este caso se toma la fracción de cenizas (Y_i) que contiene cada combustible que interviene en la optimización

$$\Gamma_z^A = \tau \cdot \dot{m}_T \cdot \left(\sum X_i \cdot Y_i \right) \quad (4.6)$$

Tabla 4.2. Carbones de diferentes regiones de Colombia

No.	Lugar de origen del carbón	PC (kJ/kg)	Contenido de cenizas (%)	Price 2008 U\$/1000 kg
1	Antioquia y Caldas	28482.75	9.12	37.19
2	Valle del Cauca	22436.64	30.40	28.30
3	Boyacá	28011.32	11.55	26.42
4	Cundinamarca	27408.44	10.19	26.80
5	Cesar	28759.25	5.28	46.73
6	Guajira (Cerrejón)	28833.62	8.30	47.18
7	Córdoba	25328.72	17.00	25.73
8	Santander	30260.67	16.35	44.88

Fuente: UPME – 2004, actualizado a 2008 con IPC

4.1.4 Modelo Termodinámico y Económico

Los métodos F-P-R (recurso-producto-residuo), son necesarios para determinar el costo exergético unitario de cada una de las corrientes del sistema, el cual sólo es optimizado normalmente por el flujo monetario cuando se asume aislamiento termoeconómico. No obstante, cuando se considera que dicho aislamiento no es tal, entonces se demuestra que hay aspectos relevantes adicionales a lo económico dependiendo del interés del evaluador. Esta metodología inicia con los normales balances de exergía, posteriormente se hacen los balances exergoeconómicos y finalmente se optimiza con base en algunas restricciones en el modelo termodinámico (Lazzaretto y Tsatsaronis, 2006). En las Tablas 4.3 y 4.4, se muestran las exergías totales de cada corriente a partir de las propiedades termodinámicas, para el sistema convencional de Termocesar y el ciclo combinado, respectivamente. Se puede discriminar los diferentes tipos de exergía, ya sea exergía química, física, mecánica, térmica, etc., las cuales se pueden desarrollar a través de conceptos descritos por Tsatsaronis (1993, 2006) o Sahoo (2007), para identificar las corrientes donde predomina estos tipos de exergía y hacer mejoras con base en esta información, pero este es un tema ampliamente tratado para analizar en otro contexto. Se puede alcanzar con el ciclo combinado, mejores rendimientos de consumo de combustible el cual es de 30.0 kg/s sobre los 33.25 kg/s para el sistema convencional. El ciclo combinado expresa la posibilidad de hacer modificaciones en cada ciclo buscando mejorar la eficiencia global, pero el aspecto más interesante son las diferencias entre los parámetros constantes para la Ec. 4.4; como se aprecia en la Tabla 4.1. Los parámetros m y n aumentan levemente para el ciclo combinado con respecto al convencional, con

lo que se infiere que hay un aumento en el costo del sistema debido a la capacidad o la eficiencia del sistema, mientras que el parámetro B es considerablemente bajo para el ciclo combinado con respecto al convencional, lo cual es una muestra de la importancia de la reconfiguración del sistema para mejorar la eficiencia.

Tabla 4.3. Propiedades de las corrientes del sistema convencional (Termocesar)

<i>No.</i>	<i>m (kg/s)</i>	<i>P (bar)</i>	<i>T (°C)</i>	<i>h (kJ/kg)</i>	<i>s (kJ/kgK)</i>	<i>ET (MW)</i>
1	7.91	0.31	69.9	2510.5	7.419	2.40
2	7.57	0.78	92.8	2633.6	7.362	3.35
3	9.82	2.36	174.7	2817.5	7.317	6.29
4	9.37	5.46	258.0	2975.8	7.26	7.65
5	9.73	10.58	339.0	3132.8	7.235	9.54
6	16.16	24.05	448.9	3348.6	7.189	19.55
7	20.23	49.90	350.8	3072.0	6.456	23.30
8	220.87	48.69	356.8	3090.7	6.496	255.88
9	220.87	43.82	540.0	3530.6	7.157	309.51
10	247.52	166.50	540.0	3404.9	6.424	369.84
11	231.31		832.1	1167.1	5.833	191.12
12	166.74	0.08	41.3	2357.9	7.535	19.33
13	182.39	0.08	41.3	172.7	0.588	0.32
14	182.39	0.08	41.6	174.1	0.593	0.33
15	182.37	0.08	41.6	174.1	0.593	0.33
16	0.02	1.01	41.6	174.1	0.593	0.00
17	0.09	5.46	223.4	2903.3	7.119	0.07
18	0.09	5.46	72.0	301.7	0.978	0.00
19	15.65	5.46	46.6	195.7	0.659	0.06
20	182.37	0.08	41.9	175.3	0.597	0.34
21	182.37	27.50	67.1	283.4	0.918	2.59
22	182.37	27.50	90.0	379.5	1.192	5.23
23	15.56	5.46	46.6	195.7	0.659	0.06
24	7.57	5.46	71.9	301.4	0.977	0.11
25	7.99	0.30	69.0	2625.2	7.771	2.50
26	203.62	0.08	41.3	172.7	0.588	0.36
27	203.62	35.00	119.7	505.7	1.524	11.39
28	203.62	35.00	152.0	643.8	1.861	19.05
29	11.43	2.29	124.5	522.6	1.575	0.66
30	2.06	5.29	154.0	2007.2	5.062	1.04
31	36.40	23.33	188.5	801.7	2.219	5.27
32	249.75	9.95	179.6	761.2	2.134	32.35
33	249.75	216.50	183.6	801.9	2.172	39.69
34	249.75	216.50	224.1	985.4	2.554	57.07
35	249.75	216.50	260.9	1160.7	2.891	75.76
36	20.24	47.23	229.0	987.7	2.599	4.40
37	7942.00	1.01	27.0	113.2	0.395	0.00
38	7942.00	1.01	38.0	159.1	0.545	9.11
39	33.25			28000.0		931.24
40	200.36			303.6	5.708	0.00
45	231.31			848.0	6.745	54.41

Fuente: Integral S.A. – Isagen, 1993

La Tabla 4.4, son las propiedades de las corrientes para generar 300 MW en un ciclo combinado, el cual se plantea a partir del modelo convencional de Termocesar .

Tabla 4.4. Propiedades de las corrientes del Ciclo Combinado

No.	m (kg/s)	P (kPa)	T °C	h (kJ/kg)	s (kJ/kgC)	ET (MW)
1	210.7	16650.0	540.0	3405.0	6.424	314.85
2	75.6	545.0	155.1	2716.0	6.708	54.51
3	135.1	4870.0	360.4	3100.0	6.510	157.21
4	135.1	4870.0	540.0	3526.0	7.104	190.83
5	11.0	77.8	103.9	2687.0	7.505	5.00
6	124.1	7.9	41.3	2418.0	7.725	14.82
7	210.7	7.9	41.3	172.8	0.589	0.37
8	210.7	77.8	41.3	172.9	0.589	0.39
9	210.7	77.8	92.8	388.4	1.224	5.91
10	210.7	16650.0	93.8	410.0	1.236	9.71
11	210.7	16650.0	260.0	1150.0	2.883	62.16
12	75.6	545.0	155.1	654.1	1.893	7.13
13	75.6	77.8	92.8	654.1	1.950	5.85
14	86.7	77.8	92.8	388.4	1.224	2.43
15	86.7	7.9	41.3	388.4	1.275	1.11
16	282.1	100.0	25	298.6	5.695	0.00
17	282.1	1000.0	344.5	625.7	5.778	85.29
18	296.6	1000.0	1250.0	1663.0	6.802	306.79
19	296.6	150.0	743.1	1065.0	6.869	123.50

La estructura productiva F-P-R de las Figuras 4.1 y 4.2, se muestran en las Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente. Una vez definida la relación F-P-R, se pueden asignar costos apropiados a los recursos, productos y residuos del sistema. El flujo de exergía residual (perdida- \dot{E}_L y destruida- \dot{E}_D) puede obtenerse combinando los flujos de exergías y las relaciones exergoeconómica de las corrientes de cada equipo k del sistema, representadas a través de las siguientes ecuaciones generales:

$$\dot{E}_{F,k} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k} \quad (4.7)$$

$$c_P \dot{E}_{P,k} = c_F \dot{E}_{F,k} + \dot{Z}_k \quad (4.8)$$

Eliminando el flujo de exergía del recurso, combinando las Ecs. 4.7 y 4.8, queda la siguiente expresión:

$$c_F (\dot{E}_{D,k} - \dot{E}_{L,k}) = \dot{E}_{P,k} (c_P - c_F) - \dot{Z}_k \quad (4.9)$$

Al aplicar los balances en cada equipo del sistema, tanto convencional como el mejorado, se pueden desarrollar las relaciones exergéticas para los recursos y productos, tal como se muestran expresadas las ecuaciones en la Tabla 4.5 y la Tabla 4.6, respectivamente.

Tabla 4.5. Definición de F-P-R para Termocesar (convencional)

No.	Equipos	Recurso (MW)	Producto (MW)
1	Caldera	$\dot{E}_{39} + \dot{E}_{35}$	$\dot{E}_{10} + \dot{E}_{11}$
2	Economizador	$\dot{E}_{11} - \dot{E}_{45}$	$\dot{E}_9 - \dot{E}_8$
3	Turbina	$\dot{E}_9 + \dot{E}_{10}$	$\dot{E}_8 + \dot{E}_7 + \dot{E}_6 + \dot{E}_5 + \dot{E}_4 + \dot{E}_3 + \dot{E}_2 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{44}$
4	Condensador	$\dot{E}_{12} + \dot{E}_{37} + \dot{E}_{19}$	$\dot{E}_{38} + \dot{E}_{13}$
5	Bomba de baja	$\dot{E}_{41} + \dot{E}_{13}$	\dot{E}_{14}
6	Intercambiador I	$\dot{E}_{17} + \dot{E}_{15}$	$\dot{E}_{18} + \dot{E}_{20}$
7	Intercambiador II	$\dot{E}_{25} + \dot{E}_{24} + \dot{E}_{20}$	$\dot{E}_{23} + \dot{E}_{21}$
8	Intercambiador III	$\dot{E}_{21} + \dot{E}_2$	$\dot{E}_{22} + \dot{E}_{24}$
9	Bomba de media	$\dot{E}_{42} + \dot{E}_{26}$	\dot{E}_{27}
10	Intercambiador IV	$\dot{E}_{30} + \dot{E}_{27} + \dot{E}_4$	$\dot{E}_{29} + \dot{E}_{28}$
11	Desaireador	$\dot{E}_{31} + \dot{E}_{28} + \dot{E}_5$	\dot{E}_{32}
12	Bomba de alta	$\dot{E}_{43} + \dot{E}_{32}$	\dot{E}_{33}
13	Intercambiador V	$\dot{E}_{36} + \dot{E}_{33} + \dot{E}_6$	$\dot{E}_{34} + \dot{E}_{21}$
14	Intercambiador VI	$\dot{E}_{34} + \dot{E}_7$	$\dot{E}_{36} + \dot{E}_{35}$

La Ecuación 4.9, se puede representar gráficamente para explicar la interrelación entre un sistema convencional y uno más eficiente. Se parte del supuesto que la ecuación no se aplica para un componente k , sino para todo el sistema, en cuyo caso la exergía del combustible tendría el mismo costo exergético unitario, además se produce la misma cantidad de flujo exergético para ambos sistemas, esto es $\dot{E}_P = \dot{E}_{P,o}$.

Tabla 4.6. Definición de F-P-R para Ciclo Combinado (mejor eficiencia)

No.	Equipos	Recurso (MW)	Producto (MW)
1	Caldera Rankine	$\dot{E}_{C1} + \dot{E}_{11} + \dot{E}_{19} + \dot{E}_3$	$\dot{E}_1 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{gases}$
2	Turbina R1	\dot{E}_1	$\dot{E}_{W1} + \dot{E}_3$
3	Turbina R2	\dot{E}_4	$\dot{E}_{W2} + \dot{E}_5 + \dot{E}_6$
4	Condensador	$\dot{E}_{36} + \dot{E}_6 + \dot{E}_{15}$	$\dot{E}_{37} + \dot{E}_7$
5	Bomba de baja	$\dot{E}_{WBB} + \dot{E}_7$	\dot{E}_8
6	Intercambiador I	$\dot{E}_5 + \dot{E}_8 + \dot{E}_{13}$	$\dot{E}_{14} + \dot{E}_9$
7	Bomba de media	$\dot{E}_{WBM} + \dot{E}_9$	\dot{E}_{10}
8	Intercambiador II	$\dot{E}_{10} + \dot{E}_2$	$\dot{E}_{12} + \dot{E}_{11}$
9	Compresor de aire	\dot{E}_{WC}	\dot{E}_{17}
10	Caldera Brayton	$\dot{E}_{C2} + \dot{E}_{17}$	\dot{E}_{18}
11	Turbina Brayton	\dot{E}_{18}	$\dot{E}_{WC} + \dot{E}_{W3} + \dot{E}_{19}$

Si se considera la Ec. 4.9 una línea recta en condiciones de aislamiento termoeconómico, se puede generar la Figura 4.3, asumiendo las siguientes características: variable independiente $(c_P - c_F)$, variable dependiente $c_F(\dot{E}_{D,k} - \dot{E}_{L,k})$, pendiente \dot{E}_P e intercepto \dot{Z} . Es importante aclarar que el costo exergético unitario del producto

es variable porque depende de la exergía perdida y destruida, la cual a su vez está relacionada con el costo del equipo o sistema; el costo exergético del recurso es constante si se tiene en cuenta un solo recurso (aislamiento termoeconómico), pero es variable cuando se consideran diferentes tipos de combustibles, lo que explica el comportamiento de la Figura 3.6 del capítulo anterior.

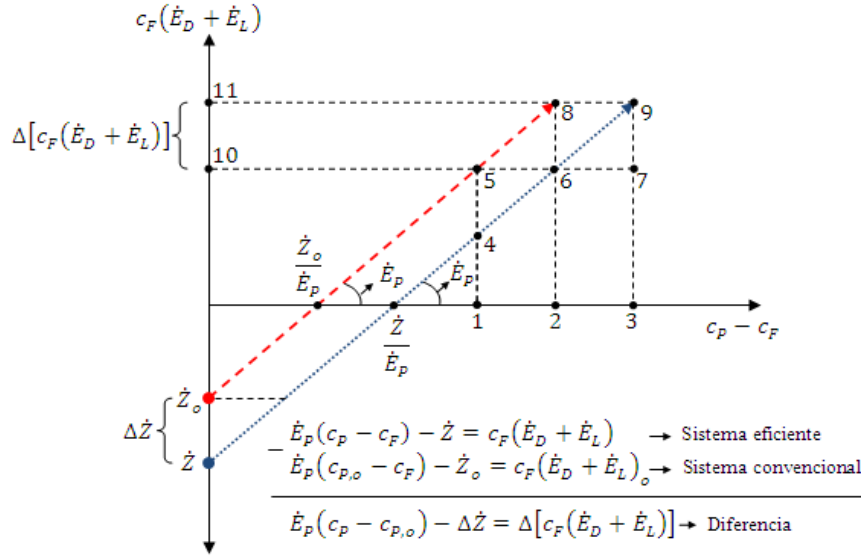


Figura 4.3. Esquema de distribución de costos entre un sistema convencional y un sistema eficiente

En la Figura 4.3, la línea punteada superior representa la distribución de costos del sistema convencional, mientras que la línea inferior es del sistema eficiente. Se espera que el costo del equipo del sistema convencional sea menor que el del eficiente y por consiguiente, los costos de exergía perdida y destruida del sistema convencional son mayores. Para ambos sistemas, la pendiente de las líneas corresponde a la exergía producida; la abscisa la conforma la diferencia entre el costo exergético unitario del producto y el costo exergético unitario del recurso, por lo tanto las unidades de esta es en U\$/kJ; la ordenada, sobre la que se encuentra ubicada los costos de los equipos de cada sistema, corresponde a los costos de exergía perdida y destruida, cuyas unidades están en U\$/s. En un caso ideal, cuando los costos de exergía perdida y destruida sean cero, la diferencia entre el costo exergético unitario del producto y del recurso es el intercepto con la abscisa que corresponde al cociente entre el costo del sistema y la exergía producida. Si la idea es establecer el ahorro que representa utilizar un sistema con respecto al otro, entonces se puede obtener la diferencia de costos entre ambos sistemas, tal como se muestra en la parte inferior de la figura, que es una ecuación análoga a la Ec. 4.4. Un aspecto importante de la Figura 4.3, es que se tiene un ahorro empleando el sistema eficiente, cuando la diferencia de costos de equipos es mayor a la diferencia de costos de la exergía perdida y destruida, la cual se traduce en una reducción de los costos de recurso. Para el caso que no haya aislamiento termoeconómico, se tiene tendencias variables, es decir, puede que se obtenga ahorros por la disminución del consumo de combustible, pero también

puede que no los haya por el uso de combustibles costosos para garantizar la reducción del impacto ambiental.

4.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Queda definido un problema MO, en el que el decisor pretende maximizar el objetivo termoeconómico y el tecnológico, pero minimizando el ambiental; para lo que requiere de técnicas no convencionales de optimización (Padilha et al., 2009). Para este caso se empleó la técnica AG, desarrollando la frontera de Pareto asignándole peso a cada uno de los objetivos normalizados (Ec. 3.34). Los pesos (w) son distribuidos a cada objetivo obteniendo una función de aptitud global (FA), que se utiliza para la optimización, tal como se muestra en la ecuación 4.7.

$$Max: FA = Re_{TH} \cdot \tau \cdot w_1 + (-Ah) \cdot w_2 - \Gamma_z \cdot w_3 \quad (4.7)$$

Donde $w_1 + w_2 + w_3 = 1$. Como se requiere minimizar Γ_z , entonces se maximiza el negativo de la función objetivo ambiental.

Inicialmente se hace una exploración de la cantidad de individuos y generaciones necesarios para encontrar mejores valores. En la Figura 4.4, se muestra el progreso de búsqueda del algoritmo evolutivo empleando diferente cantidad de individuos y generaciones para un problema MO integrado en uno solo, con pesos iguales para cada objetivo.

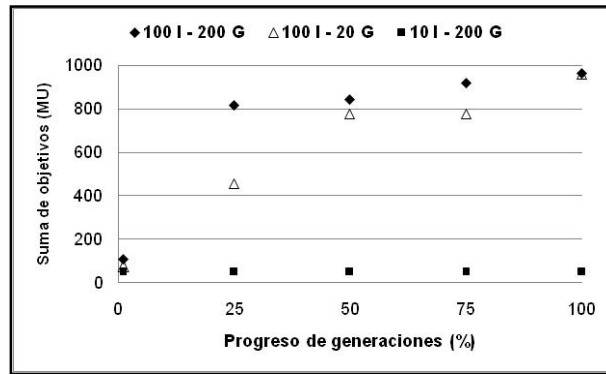


Figura 4.4. Optimización evolutiva para diferentes individuos y generaciones

Cuando se tiene la menor cantidad de individuos (I) no alcanza buenos valores, esto se debe a que no hay suficiente espacio de búsqueda para encontrar mejores combinaciones. Los puntos para más individuos tienen mejores resultados, pero la de mayor número de generaciones (G), alcanza valores más altos de la función de aptitud. Se eligieron como mejores parámetros 100 individuos y 200 generaciones para nueve ensayos a diferentes juegos de pesos. Los resultados para cada ensayo se muestran en la Tabla 4.3.

La Tabla 4.7, muestra la influencia del objetivo ambiental en los otros objetivos y la predominancia del objetivo tecnológico. Cuando se le asigna un peso alto al

objetivo ambiental, se observa que los objetivos termoeconómico y tecnológico se afectan, en algunos casos considerablemente.

Tabla 4.7 Ensayos del algoritmo evolutivo para diferentes pesos

Ensayos óptimos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pesos	$w_1 = .10$ $w_2 = .40$ $w_3 = .50$	$w_1 = .10$ $w_2 = .50$ $w_3 = .40$	$w_1 = .40$ $w_2 = .10$ $w_3 = .50$	$w_1 = .40$ $w_2 = .50$ $w_3 = .10$	$w_1 = .50$ $w_2 = .40$ $w_3 = .10$	$w_1 = .50$ $w_2 = .25$ $w_3 = .25$	$w_1 = .25$ $w_2 = 0.5$ $w_3 = .25$	$w_1 = .25$ $w_2 = .25$ $w_3 = .05$	$w_1 = .33$ $w_2 = .33$ $w_3 = .33$
Fracción									
$(Ant/Cal) X_1$	0.034	0.000	0.002	0.230	0.147	0.000	0.004	0.002	0.000
$(Valle) X_2$	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
$(Boyacá) X_3$	0.141	0.001	0.000	0.187	0.145	0.000	0.000	0.000	0.001
$(Cundi) X_4$	0.141	0.000	0.000	0.028	0.145	0.001	0.005	0.000	0.000
$(Cesar) X_5$	0.278	0.515	0.995	0.301	0.170	0.436	0.494	0.561	0.996
$(Guajira) X_6$	0.124	0.482	0.000	0.066	0.101	0.562	0.491	0.436	0.002
$(Córdo.) X_7$	0.141	0.001	0.001	0.000	0.145	0.000	0.003	0.000	0.000
$(Santan.) X_8$	0.141	0.001	0.000	0.187	0.145	0.000	0.002	0.000	0.000
$\dot{I}_{TH} * \tau (\%)$	87.2	64.0	0.3	91.9	100.0	74.4	66.2	57.5	0.0
$-Ah (\%)$	12.8	85.9	99.8	28.5	0.0	84.1	84.0	87.0	100.0
$m_z (\%)$	91.5	25.5	1.0	77.0	100.0	29.8	27.0	22.8	0.0

Cuando el objetivo ambiental se le da un peso de 0.5 (ensayos 1, 3 y 8), sólo hay una respuesta positiva cuando el objetivo termoeconómico tiene un peso alto (0.4), sin embargo, el porcentaje de ingresos en estas condiciones es muy pequeña (0.3%). Cuando se tiene el mayor porcentaje de ingresos (100%), también se genera la mayor cantidad de residuos (100%) y el ahorro con respecto al sistema convencional es cero (ensayo 5). Los mayores ahorros frente a la tecnología convencional se alcanzan cuando se utiliza en mayor proporción carbones del Cesar (5), como se muestra en los ensayos 3 (99.8%) y 9 (100%), ensayos en los que se logra también los menores porcentajes de residuos (1% y 0%, respectivamente). Para obtener valores altos en los ingresos, se nota que debe haber una mezcla de combustibles entre los que siempre está en mayor proporción el carbón del Cesar, pero intervienen otros carbones como el de la Guajira (6) y Boyacá (3). Los carbones que definitivamente no alcanzan representatividad para ser utilizados en la generación del sistema energético de 300 MW, son los carbones de Antioquia y Caldas (1) y Valle del Cauca (2), los cuales no superaron valores de 0.147 en las mezclas óptimas.

RESUMEN

Los métodos de análisis a partir de la teoría termoeconómica, han sido utilizados para analizar superestructuras energéticas (Tsatsaronis, 2007) y hacer análisis multiobjetivo de los sistemas, en los que se ha demostrado que los costos de inversión son inversamente proporcionales a los costos de operación en un ambiente de aislamiento termoeconómico (Padhila et al., 2009). Con estas condiciones, no es relevante la importancia del criterio ambiental debido a que la calidad del combustible no cambia, haciendo que la relación entre costos de inversión con los costos de operación sea siempre la misma y el criterio ambiental

solo dependa de la eficiencia del sistema, es decir que con respecto a un sistema de referencia, si hay mayores costos de inversión entonces los costos de operación son menores y probablemente el impacto ambiental es menor, pero si los costos de inversión bajan entonces los costos de operación se incrementan y con ellos el impacto ambiental. Se podría decir entonces, que el criterio ambiental es redundante con los costos de operación.

En esta sección se muestra un método de optimización incluyendo variables de entornos diferentes donde se muestra que la calidad del combustible rompe con la marcada relación inversa entre los costos de inversión y los costos de operación, debido a que la optimización es condicionada por los criterios del evaluador y cuando se asigna mayor importancia al objetivo ambiental, entonces existe la posibilidad que se escoja altos costos de operación (buena calidad del combustible) y altos costos de inversión (equipos eficientes), con el fin de bajar el impacto ambiental.

CAPITULO 5.

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS ENERGÉTICOS COMPLEJOS BAJO INCERTIDUMBRE

INTRODUCCION

El análisis multiobjetivo en un sistema energéticos (MOSE) se ha venido intensificando en los últimos años porque ha permitido enfocar el estudio de estos sistemas integralmente desde puntos de vista contextualizados en los conceptos termodinámico, diseño y económico por separado (El-Sayed, 2003). No obstante, los aspectos señalados anteriormente frecuentemente se fusionan para facilitar el estudio de los sistemas energéticos, de tal manera que el diseño queda inmerso en lo termodinámico y la manufactura en lo económico; para finalmente conformar a su vez el concepto de general denominado termoeconomía (Bejan et al., 1996). El grueso de trabajos enfocados como MOSE, separan las funciones termoeconómicas para sus análisis. Generalmente estos trabajos, hacen referencia a la eficiencia exergética y al costo total de generación de exergía (Meyer et al., 2009), con el fin de encontrar un sistema óptimo. En otras palabras, la termoeconomía y los métodos de solución no convencionales han sido el camino adecuado para diseñar sistemas energéticos óptimos, a la vez que contribuyen sustancialmente en la descripción exergoeconómica interna de los sistemas, identificando corrientes de mayores pérdidas económicas y exergéticas (Kelly et al., 2009; Toffolo y Lazzaretto, 2002).

A medida que los planteamientos requeridos para optimizar sistemas energéticos se hacen más complejos, las técnicas de análisis requeridas para la evaluación se acercan más a los métodos heurísticos, siendo los algoritmos evolutivos los referentes para estos casos (Sahoo, 2007). Los algoritmos evolutivos han permitido involucrar en la optimización de los sistemas energéticos, además de los aspectos convencionales, variables ambientales como los indicadores LCA (Life Cycle Assesment) o generación de residuos (cenizas, CO₂, NOX, etc.) también han sido capaces de mostrar grupos de soluciones óptimas de Pareto y manejar un importante número de variables de decisión y varias funciones objetivo simultáneamente (Toffolo y Lazzaretto, 2002). No obstante, los planteamientos para evaluar sistemas energéticos aún tienden a ser algo conservadoras, debido a que no se ha aprovechado la favorabilidad de los algoritmos evolutivos para evaluar múltiples situaciones. Los investigadores que han dedicado esfuerzo en la optimización de sistemas energéticos aplicando este tipo de metodologías, a pesar que utilizan información del entorno del sistema, omiten aspectos de este que puede ser importante, tal como la incertidumbre asociada a la información recolectada. El sistema energético requiere del entorno principalmente el combustible, el cual puede ser sólido, líquido o gaseoso, con diferentes calidades, precios y disponibilidades; esto hace que el tipo y calidad del combustible influya en el diseño del sistema. Por otra parte el sistema aporta al entorno el producto y

los residuos; los primeros tienen asociados la incertidumbre del precio del mercado y los segundos dependen de la calidad del combustible y la tecnología utilizada para el sistema energético. Es claro que la evaluación termodinámica de un sistema energético, requiere de parámetros físicos del entorno como la presión y la temperatura, pero en el caso de que la evaluación sea termoeconómica, los parámetros trascienden las fronteras de lo físico, requiriendo además de estos, parámetros económicos que generalmente son inciertos.

Se ha encontrado evidencia concreta sobre la aplicación de la incertidumbre en la optimización de sistemas energéticos, pero en la literatura se muestra gran cantidad de trabajos en esta temática aplicados a diversos planteamientos científico; algunos de estos trabajos están reseñados en la sección de estado del arte contenido en el capítulo de introducción de esta tesis. Un trabajo que tiene cierta relación con este capítulo, es el desarrollado por Li et al. (2009), en el que aplica una metodología de simulación coordinada con un algoritmo genético para el diseño de un proceso químico favorable ambientalmente. Más adelante se hace una descripción sucinta sobre los aspectos a tener en cuenta para el manejo de la incertidumbre en este trabajo.

Retomando los algoritmos evolutivos, la versatilidad de estos hace viable la posibilidad de pensar en nuevas alternativas de optimización, la evaluación multiobjetivo o una combinación de estas (Salazar et al., 2007). Con base en lo anterior, este capítulo es una representación teórica de la optimización de un sistema energético afectado por variables externas, conformadas por la relación costo/calidad del combustible y el precio del producto. Para ello se tuvo en cuenta las condiciones de precio de carbones y precio de la electricidad en un escenario colombiano donde eventualmente funcionaría el sistema, por lo tanto, se incluyen las fluctuaciones del precio de la energía en bolsa y con el fin de establecer la mejor ubicación del sistema se emplean diferentes tipos de carbones dada la abundancia de oferta, precio y calidad del mineral. El contenido del capítulo inicialmente hace referencia a la definición de las variables del sistema aclarando la diferencia entre las internas y externas, luego se muestran los diferentes métodos de evaluar económicamente los sistemas con simulación para experimentos estocásticos y los modelos matemáticos necesarios; finalmente se presenta el tratamiento de la incertidumbre, la forma como se hace una estructura de costos para un sistema energético y los resultados para un caso particular en Colombia.

5.1 DEFINICION DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL SISTEMA

Se tienen en cuenta la aplicación de los conceptos exógeno y endógeno en sistemas energéticos, explicados claramente en el estudio sobre la disponibilidad y no disponibilidad de exergía destruida (\dot{E}_D) (Von M.Phil, 2008). Se muestra que la exergía destruida endógena es aquella contenida en el sistema y que lo puede afectar; y la exógena es aquella que esta por fuera del sistema, pero sin embargo, también lo afecta. Haciendo la analogía, las variables endógenas presentadas en este trabajo son las que comúnmente se evalúan en los análisis termoeconómicos,

ya sean para la optimización o identificación de pérdidas exergoeconómicas, entre las variables endógenas están las corrientes que comunican los equipos y las variables de diseño del sistema; las variables exógenas, para el análisis de este trabajo, serían aquellas que no hacen parte directa del sistema pero que indudablemente lo afectan, entre estas se consideran los diferentes tipos de combustibles (calidad/costos); la exergía producida (precio de bolsa) y generación de residuos (cenizas, CO₂, NO_x, SO_x). Como se ha presentado en todo el trabajo, la principal característica que demarca la estructura conceptual de esta investigación está dirigida frontalmente a las implicaciones que tiene los alrededores con el sistema energético, reiterando el interés en demostrar que los alrededores del sistema condicionan su funcionamiento y por ende la optimización no es exclusivo del sistema, sino de un todo integrado sistema-alrededores.

Como se ha explicado claramente en el capítulo 3, las variables y condiciones de funcionamiento del sistema están asociadas a funciones económicas representadas por modelos del mismo nombre. Sin embargo, es importante establecer el origen de los costos y sus implicaciones en el análisis termoeconómico; es por ello que se hace necesario explicar detalladamente el sistema y las relaciones económicas de las variables internas, como también de las características de las variables externas, tal como especifica a continuación.

5.1.1 Descripción del Sistema y Variables Internas

Las diferentes metodologías de análisis de sistemas energéticos, se han aplicado principalmente en el CGAM, el cual fue descrito en el capítulo 2 (Valero, 1993; Padilha, 2009). En esta sección se hace una descripción completa del sistema para hacer un análisis del comportamiento de las variables internas cuando el sistema es afectado por variables externas. Los modelos físico, termodinámico y económico del CGAM están explicados claramente por Lozano y Valero (1993), los cuales están consignados en el apéndice de este trabajo, representan un sistema de cogeneración que produce cantidades fijas de electricidad y vapor saturado. La producción de electricidad es de 30 MW y la rata de flujo másico de vapor saturado a 20 bares es de 14 kg/s. Los equipos que conforman el CGAM son un compresor de aire que lleva aire comprimido, previamente precalentado en un intercambiador de calor (precalentador de aire), a la cámara de combustión. Los gases producto de la combustión, son conducidos a una turbina de gas que genera la electricidad de la cual una parte se usa para alimentar el compresor de aire. Una vez que los gases salen de la turbina de gas, se utilizan para precalentar el aire de combustión y luego pasa por un HRSG para evaporar agua.

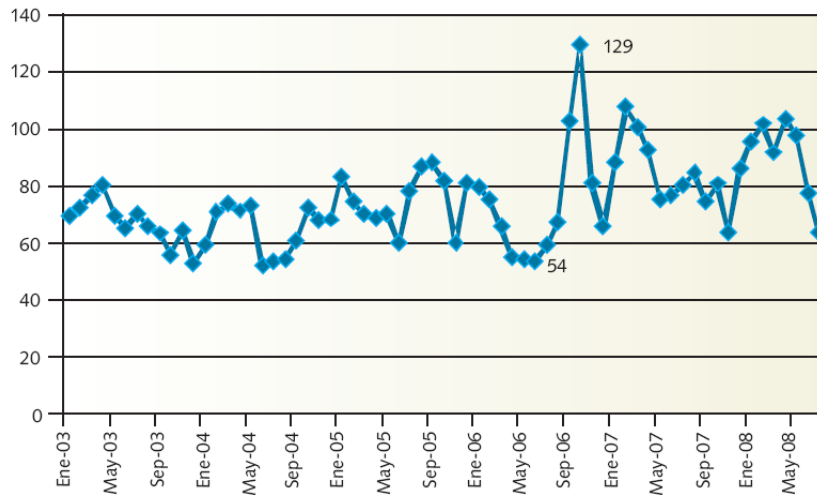
Los autores que utilizan el CGAM para aplicar sus teorías de optimización, toman como combustible al gas natural con un poder calorífico inferior de 50000 kJ/kg y variables de decisión la relación de presión del compresor de aire ($r_p = P_2/P_1$), las eficiencias isentrópicas del compresor de aire (η_{CA}) y de la turbina de gas (η_{TG}), la temperatura del aire a la entrada a la cámara de combustión (T_3) y la temperatura de los gases que entran a la turbina (T_4). Los valores posibles de estas variables de decisión son los siguientes: $7 \leq r_p \leq 15$; $0.7 \leq \eta_{CA} \leq 0.9$; $0.7 \leq \eta_{TG} \leq 0.9$; $700\text{ K} \leq T_3 \leq 1100\text{ K}$ y $1100\text{ K} \leq T_4 \leq 1500\text{ K}$. En este caso, la única variable externa del

sistema es el combustible, cuya calidad permanece constante durante la evaluación. A diferencia de los estudios previos a este trabajo, el CGAM tendrá calidad del combustible variable y se considerará la incertidumbre en el precio del producto, tal como se explica en la siguiente sección.

5.1.2 Variables Externas del Sistema Energético

Las variables externas que afectan el sistema, son la calidad y el precio del combustible, el precio del producto (precio de bolsa de la energía eléctrica-incertidumbre) y los residuos generados por la combustión. La calidad y el precio del combustible, se detalla en la Tabla 4.2, del capítulo anterior. En la Figura 5.1, se muestra el precio en bolsa de la energía eléctrica en Colombia, durante el periodo 2003-2008. Se nota la sensibilidad de las variaciones del precio de un punto a otro, evidenciando la incertidumbre en los precios del mercado de energía eléctrica. En el trabajo desarrollado por Dyer et al. (2008) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, hay una descripción detallada, no sólo de las componentes del precio de la energía eléctrica en la bolsa en Colombia, sino que hace una descripción completa del mercado de la energía y menciona algunos aspectos que inciden en el comportamiento al azar del precio de la energía en bolsa y las implicaciones que este tiene en los sistemas de generación térmica. Al ser incierto el precio de bolsa debido en alguna medida al comportamiento de la demanda de la energía, se han derivado investigaciones basadas en simulación Montecarlo para mejorar la confiabilidad de generación en las centrales térmicas e hidroeléctricas (Zapata y Campos, 2005).

Asumiendo que la incertidumbre en el precio de bolsa se conserva aproximadamente dentro de unos límites promedios para un periodo de tiempo y considerando que los fenómenos que producen tal incertidumbre mantengan su comportamiento, se tiene una función de distribución de probabilidad semejante a la normal que fluctúa y repite en cada periodo de evaluación.



Fuente: UPME

Figura 5.1. Precio de la energía eléctrica en la bolsa (\$/kWh), 2003-2008

Según la organización de los datos año por año y el periodo global 2003-2008, se obtuvo una curva formada por los intervalos y la frecuencia de repetición de los datos presentados en la Figura 5.2, con lo que se puede apreciar el sesgo de la curva de distribución

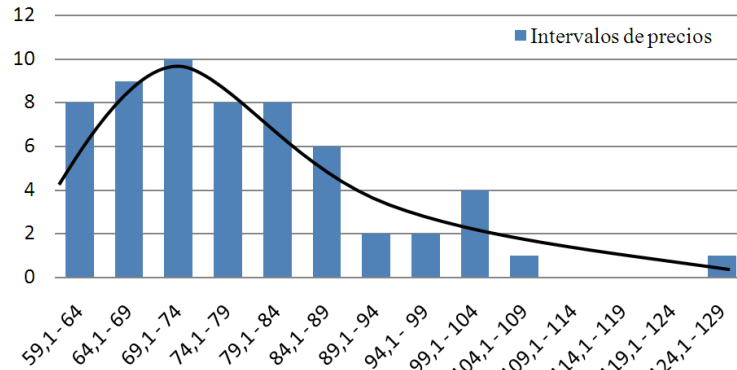


Figura 5.2. Distribución del Precio en Bolsa (\$/kWh) de Energía Eléctrica en Colombia

Los precios de la energía eléctrica se pueden organizar para construir un diagrama de distribución de frecuencia, con el fin de establecer las probabilidades de ocurrencia del precio en un entorno específico. Si se toma otro escenario, diferente al colombiano, es probable que la distribución sea diferente y por ende el entorno del sistema también lo sería. Se pretende optimizar con este escenario al sistema CGAM, para establecer si los posibles cambios del entorno muestran variaciones significativas en el modelo optimizado.

Otro aspecto externo a considerar, son los residuos generados por el sistema los cuales son producto de la combustión del carbón. Las emisiones consideradas más importantes en los sistemas de generación y en la industria en general son los óxidos de azufre (SOx) y óxidos de nitrógeno (NOx), debido a los trastornos que le ocasionan al medio ambiente. Los residuos se pueden representar en modelos de indicadores evaluación de ciclos de vida del combustible-LCA (Rosen, M.A. y Dincer, I., 2001), también se pueden desarrollar modelos de reducción de emisiones como los NOx y SOx (Lazzaretto A. y Toffolo A., 2004) y por último se pueden presentar modelos que relacionan el costo del combustible con la generación de emisiones, teniendo en cuenta la cantidad de exergía generada por el sistema (Abido M.A, 2009; Vahidinasab V. y Jadid S., 2009). Las emisiones también se pueden modular a través de funciones que asocian las emisiones con la producción de energía por cada unidad generadora. Las emisiones de SOx son dependientes del consumo de combustibles y toman la misma forma que la función de costo modular, ya que provienen de distintas fuentes y su producción es asociada con varios factores tales como la temperatura de la caldera y el contenido de aire. Una aproximación para representar las emisiones de SOx y NOx es usar la función polinomial para las emisiones de SOx y la función exponencial para las emisiones de NOx. (Wang y Singh, 2007). Para el caso de este trabajo el factor de emisión utilizado, como se ha venido haciendo en el desarrollo de los capítulos anteriores, es el porcentaje de cenizas producido,

considerando este como un criterio de calidad para el comercio del carbón (UPME, 2008) y por tener una relación directa con los demás contaminantes, es decir, que un combustible con mayor cantidad de cenizas que otro tiene la capacidad de generar mayor contaminación por emisión de gases debido a que se requiere mayor cantidad de combustible para hacer la misma operación (Gutiérrez, 2005).

5.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA

A pesar que los modelos económicos predicen los costos de generación de exergía de un sistema energético, la construcción detallada estos costos es importante porque permite determinar las etapas y los componentes del sistema que requieren mayor esfuerzo energético y económico, lo que permite implementar acciones de mejoramiento en las condiciones de operación y en la distribución de los costos. El diseño eficiente de un sistema térmico es importante porque logra el mejor provecho energético del combustible utilizado, respetando las restricciones físicas; pero en un medio capitalista, hay que tener en cuenta los costos asociados que son necesarios para alcanzar el diseño eficiente. Esto conduce a ampliar las restricciones porque se debe introducir el capital total necesario para invertir, el costo de los combustibles, los costos de operación y mantenimiento y el costo final del producto. En otras palabras la transformación de la energía requiere de la inversión en mayor o menor medida de capital. A mayor inversión se espera obtener mayor cantidad de energía útil; los casos de los costos de combustibles y de O&M, pueden variar dependiendo de escenarios escogidos para el sistema. Los ingresos por venta de la energía también se analizarán debido a que es importante establecer el punto de equilibrio de generación.

La distribución de costos e ingresos se aprecian en la Figura 5.3, donde se intenta dilucidar la importancia de la relación del costo final del producto con el precio en el mercado, la demanda, la disponibilidad, la competencia, la regulación y los subsidios, si los hubiere. Se utilizará todos los costos de producción y solo la demanda y el precio del mercado para estimar la probabilidad de recuperación de la inversión. Los costos totales están formados por los costos fijos y los costos variables. El termino costo fijo identifica aquellos costos que no dependen forzosamente de la producción. Los costos de depreciación, tasa de interés, seguro, mantenimiento y renta son de esta categoría. Los costos variables son aquellos costos que varían directamente con el volumen de producido; estos incluyen los costos de material, servicios, combustible y energía eléctrica.

La Figura 5.3, es un esquema representativo que compara el flujo de fondos de convencional y el sistema evaluado. Las áreas demarcadas representan la utilidad y el ahorro, que constituyen el objetivo termoeconómico y el tecnológico, respectivamente. El área ABED corresponde a los costos fijos del sistema convencional, mientras que el área ACFD es del sistema evaluado; la línea BM representa los costos variables del sistema convencional y la línea CL es del sistema evaluado. El área del triángulo KMN es la utilidad del sistema convencional y la del triángulo ILN del sistema evaluado. Con esta demarcación se puede identificar las áreas de interés; el área de ahorro entre los sistemas u

objetivo tecnológico, la cual corresponde al área del triángulo JLM y la utilidad u objetivo termoeconómico demarcada por el área del triángulo de utilidad (ILN) del sistema de mayor eficiencia.

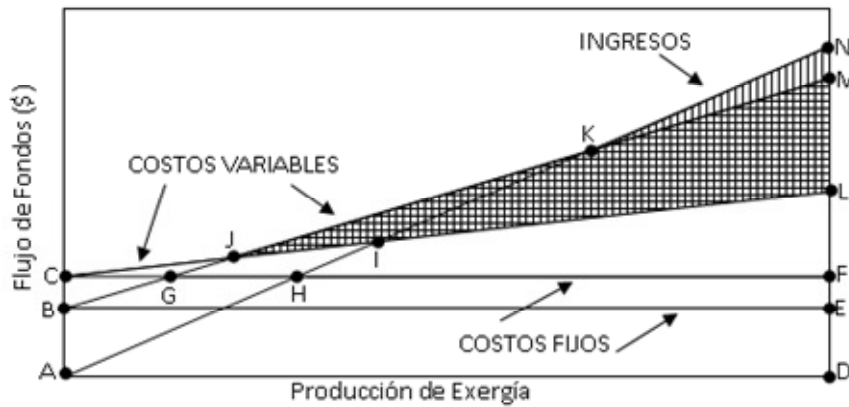


Figura 5.3. Flujo de costo e ingresos involucrados en el análisis económico

Esta figura permite hacer observaciones sobre la optimización del sistema evaluado. La eficiencia exergética de este sistema depende de las condiciones del entorno; si los requerimientos de exergía son menores al óptimo calculado sin restricciones, se tendría que emplear el sistema con un rendimiento inferior. En la figura esto se puede representar trasladando la línea DN hacia la izquierda; si la exergía requerida es tal que la línea DN intercepte el punto K, el sistema convencional no generaría utilidades, ahora si se traslada hasta interceptar el punto I, el sistema evaluado no generaría utilidades. El intercepto de la línea DN con el punto J, supone que el sistema evaluado alcanzaría una eficiencia exergética teórica similar al del sistema convencional, con lo que queda establecido la influencia del entorno en el desempeño del sistema. La eficiencia exergética del sistema evaluado, también se puede optimizar teniendo en cuenta la tecnología con respecto al sistema convencional. Es lo mismo que maximizar el área de ahorro (triángulo JLM), lo cual se puede lograr disminuyendo la pendiente de la línea CL, tratando que la línea CF se mantenga en su sitio y los costos totales del sistema convencional se mantengan fijos. El hecho que disminuya la pendiente de la línea CL, hace que haya un aumento propio de la línea CF; dependiendo del aumento de la línea CF se tiene un comportamiento colaborador o contradictor entre los objetivos termoeconómico (utilidad) y tecnológico (ahorro).

Se tendrán en cuenta varios supuestos económicos, tecnológicos y ambientales, y el uso de técnicas de Ingeniería Económica. Las consideraciones económicas más importantes tenidas en cuenta son: a) estimación de capital invertido (costos de Inversión) b) cálculos de los principales costos del producto bajo supuestos realistas de inflación, escala de costo, nivelación de costos, depreciación, tasa de interés y financiación de la inversión inicial; c) evaluación de la probabilidad de alternativas de inversión y d) probabilidad de la recuperación de la inversión por ingresos, debido a la venta del producto. Finalmente, debido a la variabilidad de la información externa al sistema, es necesario hacer un enlace entre la simulación

de las variables inciertas y aleatorias con el modelo de optimización del sistema energético (Li et al., 2008).

5.2.1 Capital Total Invertido (CTI)

A diferencia de los costos de combustible y los costos de O&M que son continuos, el costo de inversión se dan una vez. Este costo de inversión es requerido para suplir todas las necesidades que lleven a punto el sistema, por tanto es utilizado para comprar terreno, edificios, maquinaria, instalaciones. El capital total invertido es la suma del capital fijo invertido (CFI) y otros costos (gastos). A continuación se muestra una lista general de los CTI para un nuevo sistema (Bejan et al., 1996).

I. CAPITAL FIJO INVERTIDO (CFI)

A. Costos directos (CD)

1. Costos onsite (CONS)

- Costo de equipo (CE; 15-40% de CFI)
- Costo de instalación de equipos (20- 90% de CE; 6-14% de CFI)
- Tubería (10-70% de CE; 3-20% CFI)
- Instrumentación y controles (6-40% de CE, 2-8% de CFI)
- Equipos y materiales electrónicos (10-15% de CE; 2-10% de CFI)

2. Costos offsite (COFSC)

- Terreno (0-10% del CE; 0-2% del CFI)
- Adecuaciones y trabajo de arquitectura(15-90% del CE; 2-10% del CFI)
- Servicio (30-100% del CE; 8-20% CFI)

B. Costos indirectos (CI)

1. Supervisión e ingeniería (25-75% del CE; 6-15% de CD; 4-21% del CFI)
2. Costos de construcción incluyendo ganancias del contratista (15% de CD; 6-22% de CFI)
3. Contingencias (8-25% de la suma de los costos anteriores; 5-20% de CFI)

II. OTROS COSTOS

A. Costos de arranque (5-12% de CFI)

B. Capital de trabajo (10-20% CTI)

C. Costos de licencias, investigación y desarrollo

D. Asignación de fondos usados durante la construcción (AFUDC)

$$\begin{aligned} \text{Capital total invertido} &= \text{capital fijo invertido} + \text{otros costos} \\ &= \text{costos directos} + \text{costos indirectos} + \text{otros costos} \end{aligned}$$

Como se muestra en la tabla anterior, el CTI hace referencia a los costos iniciales como la mayor inversión en el proyecto energético, por lo tanto, generalmente estos costos requieren de financiación. En un flujo de fondos el CTI, hace referencia al costo presente neto.

5.2.2 Costo del Producto (C_P)

Hay varios métodos para calcular el costo del producto de un sistema energético, ya sea por el relegado balance económico o a través de los más utilizados y novedosos métodos nacidos del análisis termoeconómico (Lazzareto y Tsatsaronis, 2006). Los primeros métodos surgen de sumar todos los costos nivelados requeridos para la generación y estos deben ser iguales al costo nivelado del producto; mientras que los segundos se basan en criterios termodinámicos combinados con teorías económicas, en la que se atribuye a los costos de generación una estrecha relación con la transformación de la exergía y por lo tanto el costo del producto debe ser analizado a partir de criterios termoeconómicos y no solamente económicos, teniendo en cuenta que la termoeconomía permite determinar los mayores costos marginales y las corrientes que transportan cantidades importantes de energía en el sistema (Uche, 2000).

Los principales métodos termoeconómicos para el cálculo de costos, tiene como punto de partida la teoría del costo exergético, los enfoques LIFO, SPECO y AVCO y el análisis funcional termoeconómico, demarcados en la teoría estructural de costos (Bosh J., 2007). No obstante, la ecuación de costos del producto resulta de la suma de los costos nivelados de inversión y los costos de nivelados de operación que hacen referencia a los costos de combustible, pero como el producto obtenido por lo general permanece constante en la evaluación, se hace referencia expresamente al costo exergético unitario del producto, tal como lo describe Bejan et al. (1996) representado con la siguiente ecuación, cuando abordan el tema sobre la optimización de un sistema energético:

$$c_P = \frac{c_F \cdot \dot{E}_F + \dot{Z}}{\dot{E}_P} \quad (5.1)$$

En la ecuación anterior \dot{Z} hace referencia a los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento en función de los costos totales de inversión (ver capítulo 2).

5.2.3 Alternativas de Inversión Probables

Estas secciones en adelante, se han tomado del trabajo desarrollado por Galván (1987), sobre el planeamiento y proyección de plantas nucleares, el cual contiene un procedimiento similar al planteado para sistemas termoenergéticos. Para los estudios globales de viabilidad económica relacionados con el análisis multiobjetivo de sistemas de producción, incluyendo los sistemas energéticos, se pueden catalogar como de los más complejos (Li et al., 2009). Esta complejidad se deriva fundamentalmente del elevado nivel de incertidumbre que rodea tanto las variables estrictamente económicas como las ambientales que rodean a las mismas. Tal incertidumbre conduce frecuentemente a emplear supuestos lógicos que excluyen la conducta real de variables del entorno caracterizadas por comportamientos aleatorios y difusos, dificultando el análisis del sistema energético, desviando el esfuerzo a discusiones extenuantes entre fuerzas políticas y sociales, y en continuos aplazamientos de la toma de decisión sobre la

implantación o no de las mismas (Galván, 1987). En líneas generales, la meta que se pretende lograr es proporcionar un método sistemático de análisis económico relacionado con los procesos exergéticos del sistema que permita obtener la mayor cantidad de información posible sobre las variables de tipo económico y termoeconómico que se vean involucradas en una inversión de este tipo con el fin de alcanzar diseños robustos del sistema. Un análisis económico como el que se pretende abarcar, consta fundamentalmente de los siguientes puntos:

- a. Determinación de todos los indicadores económicos que permiten una toma de decisión sobre una inversión, básicamente:
 - Tasa de Rendimiento Interno (*TIR*)
 - Valor Capital (*VC*)
 - Plazo de Recuperación (*PR*)
 - Estructura de Costos (*C*)
 - Estructura del flujo de caja (*CF*)
- b. Campo de viabilidad de los anteriores indicadores en caso de variaciones en las previsiones del estudio, así como las distribuciones acumuladas de los mismo.
- c. Probabilidades de obtener los indicadores y medida del riesgo asociado a cada uno.
- d. Sensibilidades de los mismos a las variables individuales y conjuntas de las variables del entorno económico. Determinación de puntos críticos.
- e. Políticas de financiación y amortización idóneas en cada caso.

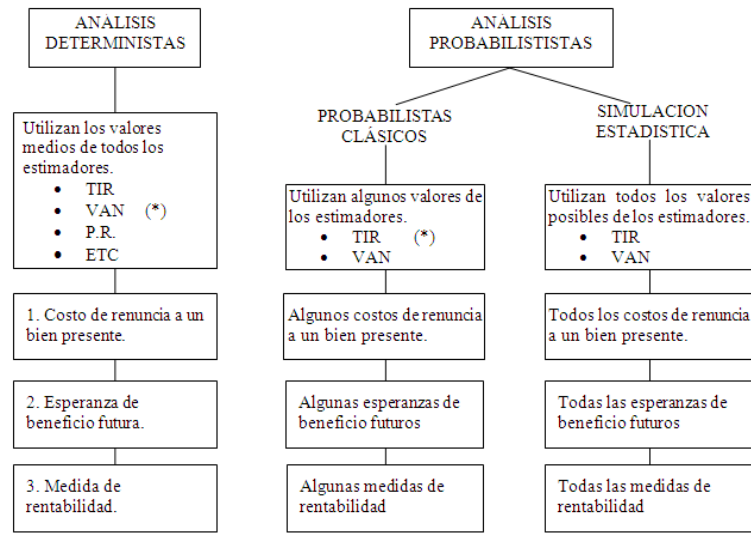
En el análisis termoeconómico como una puesta inicial, tiene en cuenta la variabilidad del precio del producto y las diferentes calidades y precios del recurso, manteniendo constantes el resto de costos a considerar. Cuando se involucran costos e ingresos hay varias alternativas de evaluación, las cuales se consideran a continuación.

5.2.3.1 Métodos de Análisis Económico.

En líneas generales se pueden contemplar dos grandes formas de realizar el análisis económico de un flujo de fondos ingresos-egresos; una forma resulta al emplear métodos deterministas clásicos y la otra, emplea métodos probabilistas. La diferencia fundamental entre estos dos métodos de análisis está en la cantidad de información que se extrae de las medidas de rentabilidad más que en los estimadores de la misma, que son los mismos. Así, mientras que por un lado los métodos deterministas se limitan a calcular los valores puntuales de los estimadores de la rentabilidad, los métodos probabilistas permiten calcular además las distribuciones más probables de los mismos y su probabilidad individual. En la Figura 5.4 se presentan someramente las analogías y diferencias entre unos métodos y otros.

Entre todos los métodos presentados en la Figura 5.4, el método de análisis mediante simulación estadística (Tipo Montecarlo) es el que presenta mayores ventajas que se pueden concretar en:

- a. Permite estudiar todas las variables intermedias y valores finales de los estimadores de rentabilidad comprendidos en los objetivos de este capítulo.
- b. Puede trabajar con toda la gama de valores posibles para cada una de las variables de entrada, por lo que se desperdicia muy poca información sobre las mismas.
- c. Responde a mayores criterios de realismo económico, ya que puede simular de manera más sencilla la marcha previsible y no previsible del entorno económico de la inversión.
- d.



*Existen pérdidas de información por no considerar todos los valores posibles de los estimadores (se tratan de corregir mediante análisis de sensibilidad).

Fuente: Galván (1987)

Figura 5.4. Comparación de los diversos métodos de análisis de inversiones

- e. Dadas sus especiales características es programable con cierta facilidad, lo que permite una gran flexibilidad al realizar los cálculos. Es posible contemplar realimentaciones de información, lo que permite emprender el estudio de problemas de optimización económica y financiera.

5.2.3.2 Experimento de Simulación.

En general, la planificación del experimento de simulación ha sido ampliamente estudiada en las dos pasadas décadas, el caso particular de experimentos de simulación de sistemas económicos ha tenido especial desarrollo. El proceso general consta de 9 fases perfectamente diferenciadas cada una de ellas con sus problemas específicos, tal como se aprecia en la Figura 5.5.

En los capítulos anteriores se evalúan dos modelos de optimización diferentes, los cuales responden a las expectativas generales de esta sección. Las principales características de los modelos de optimización estudiados tienen que ver con la estructura de los objetivos planteados. En el primer modelo de optimización, se aprecia cierta similitud en la constitución matemática de los dos primeros objetivos y por ende se esperaría que la dependencia en el comportamiento del

uno con respecto al otro sea obvia (ver capítulo 3), sin embargo, se pudo demostrar que tal dependencia se presenta cuando hay solamente una alternativa de calidad del combustible o recurso, en caso contrario, el comportamiento es totalmente aleatorio.

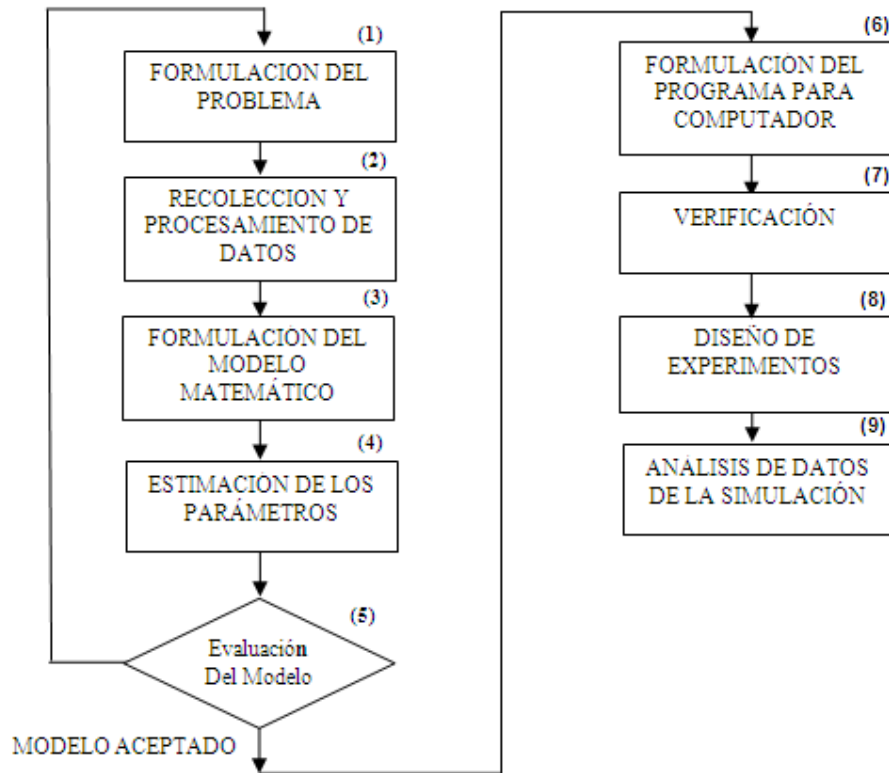


Figura 5.5. Fases de la planificación.

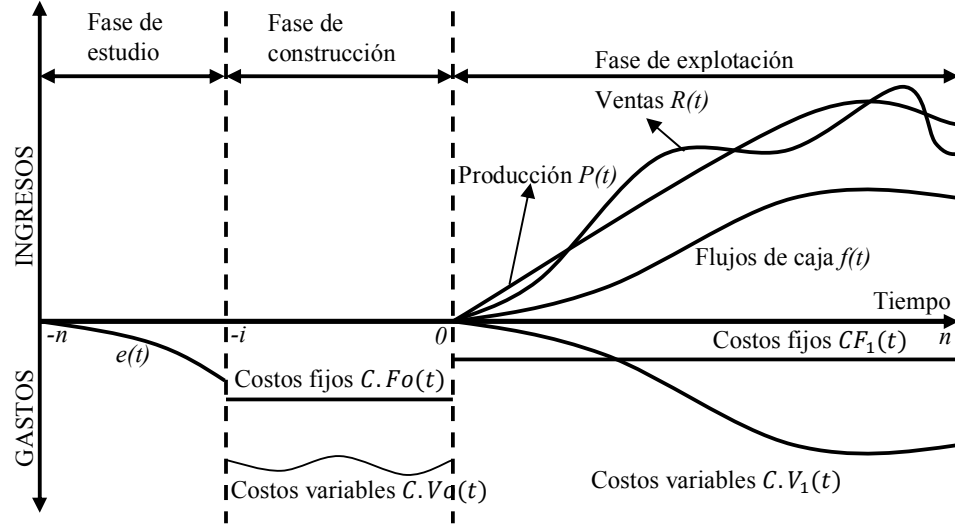
No obstante, para el otro modelo de optimización se hizo una reforma del primer objetivo (ver capítulo 4), en el que se aprecia la influencia del precio del producto y se modifica completamente la estructura matemática con lo que no solo se evita cualquier dependencia marcada sino que también permite evaluar el modelo para diferentes precios del producto y en un caso de mayor complejidad, cuando el precio provenga de una distribución de probabilidad. En los casos donde haya comportamientos aleatorios o probabilísticos, la simulación Montecarlo es una buena alternativa para utilizar en la optimización, como la propuesta de este capítulo.

5.2.3.3 Análisis Económico y Matemático en la Instalación de un SE.

En líneas generales se pueden apreciar tres fases en la vida de la instalación de un sistema, ya sea energético o su equivalente, la cual se aprecia en la Figura 5.6:

- Fase de Estudio. En la cual se concibe la instalación, se realiza el estudio de viabilidad y se realiza el proyecto de la misma. Periodo $(-n, -i)$ de la Figura 5.6.

- b. Fase de Construcción. El periodo de tiempo comprendido entre el comienzo de las obras y la puesta en marcha de las instalaciones. Periodo $(-i, 0)$ en la Figura 5.6.
- c. Fase de explotación. El periodo de tiempo comprendido entre la puesta en marcha y el abandono definitivo de la explotación. Suele denominarse “Vida Útil” de la instalación, el periodo $(0, n)$ de la Figura 5.6.



Fuente: Galván (1987)

Figura 5.6. Fases de vida de una instalación

La esperanza de beneficios se ha llamado en la bibliografía como valor capital de una inversión cuya función general puede ser, teniendo en cuenta la funciones de la figura anterior, la siguiente.

$$V.C = -A + AR(P/F, i, n) + \int_0^n f(t) \cdot \left(\frac{P}{F}, j, t\right) dt \quad (5.2)$$

$$A = \int_{-n}^{-i} e(t) \left(\frac{P}{P}, j, t\right) dt + \int_{-i}^0 CV_0(t) + CF_0(t) \left(\frac{P}{P}, j, t\right) dt \quad (5.3)$$

$$AR = A - \int_0^n D(t) dt \text{ con } (1 + k)^n = e^{jn}$$

Donde

$D(t)$ = Función de Depreciación

$(\text{ } / F, k, n)$ = Valor presente sobre un valor futuro a una tasa de descuento k por un periodo de n años = $1/(1 + k)^n$

$(P/P, J, t)$ = Valor presente sobre un valor pasado a una tasa de actualización i por un periodo de t años = e^{jt}

$V.C.$ = Valor Capital

$A.$ = Inversión en el día de la puesta en marcha.

$A.R.$ = Valor residual de la inversión.
 $C.F.$ = Costos fijos (función de)
 $C.V.$ = Costos variables (función de)
 j = Tasa de interés nominal continuo
 i = Tasa de interés compuesto anual

Generalmente en el análisis económico de los sistemas energéticos, todos los costos son trasladados al tiempo cero y para el caso planteado en este trabajo, esta regla no es la excepción, debido a la posibilidad de determinar el valor presente neto del proyecto como factor importante de evaluación.

5.2.3.4 Solución Integral del Modelo Económico.

Descomponiendo el tiempo en intervalos no es difícil demostrar que la tasa de rendimiento interno es aquel valor de r que satisface la ecuación:

$$VPN = A - AR\left(\frac{P}{F}, r, n\right) + \sum_0^{n-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} f(t)\left(\frac{P}{F}, j, t\right) dt \quad (5.4)$$

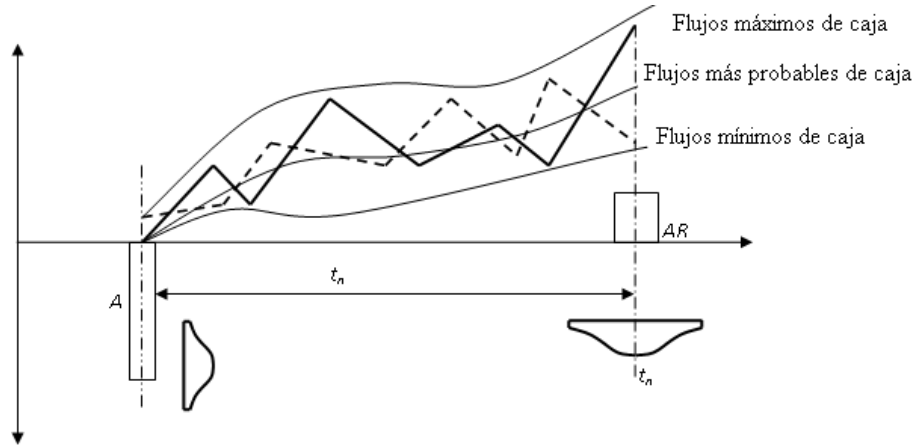
Donde $\left(\frac{P}{F}, r, n\right) = 1/(1 + K)^n$; $\left(\frac{P}{F}, j, t\right) = e^{-jt}$

Cuyos componentes tienen los mismos significados en el aparato interior. El proceso de resolución por simulación computacional puede ser el siguiente:

1. Se establece un modelo económico para el cálculo del VPN cuyo modelo matemático fue descrito anteriormente, teniendo en cuenta tres aspectos especiales: a) para la población inicial, hay escogencia de mezclas de combustibles aleatoriamente y por lo tanto los costos de combustibles son aleatorios, b) el precio del producto se ingresa sistemáticamente con una probabilidad de ocurrencia para cada simulación y cada periodo de vida útil del sistema y c) se asume que los demás costos y tasas se mantienen constantes. Algunas generalidades sobre la incertidumbre, se estudiarán más adelante.
2. Se integra el modelo económico anterior con el modelo de optimización. Para abordar la mayor cantidad de información, no se construye la frontera de Pareto a través del método de las ponderaciones (pesos) sino que se recurre al método NSGA-II, desarrollado por Deb (2002), el cual describiremos brevemente más adelante.
3. Como el método NSGA-II cubre uniformemente la mayor cantidad de puntos de la frontera, se escoge el punto óptimo con menor distancia al punto teórico establecido por el evaluador y mayor distancia al punto óptimo ideal negativo. Este método de escogencia del punto óptimo se conoce como TOPSIS, sobre el cual se hace una descripción más adelante.
4. Se calcula los valores para el intervalo de tiempo de las funciones $f(t)$ y VPN , se acumulan estos resultados y se elabora la distribución de probabilidad.

5. Se comprueba si la suma de los intervalos de tiempo es mayor que t_n . Si es mayor se calcula el valor residual de la inversión y se calculan los valores finales de $f(t)$ y VPN .

Se correrán “ m ” historias hasta que los promedios de $f(t)$ y VPN sean tales que se obtenga una distribución de frecuencias bien definidas. En la siguiente figura se representan gráficamente dos de las simulaciones una en negrita y otra a trazos.



Figura

5.7. Proceso resolvente integral

5.2.3.5 Solución Discreta del Modelo Económico.

Considerando unas tasas de interés fijo para cada periodo de tiempo y considerando las funciones de distribución de probabilidad (FDP) de las variables como dependientes de cada intervalo, se puede obtener:

$$VPN = -A + AR \left(\frac{P}{F}, r, t_n \right) + \sum_{i=1}^n \left[f_{t_i} \left(\frac{P}{F}, j, t_i \right) \right] \quad (5.5)$$

Los significados de cada componente son los mismos que en el apartado anterior. Los pasos de simulación serán los mismos que antes pero considerando los intervalos de tiempos todos de igual longitud (por ejemplo 3 meses, 1 año, etc.). En la figura siguiente se puede observar la forma de proceder en la simulación de un proceso general de forma resolvente discreta. Simplificando más, se puede llegar a suponer que las funciones de distribución de probabilidad ($F.D.P$) no dependen del tiempo (por ejemplo, por escases de información), esto conduce al método de Hertz (1978) para el análisis del riesgo en las inversiones de Capital Fijo, todos los conceptos mencionados aún tienen vigencia en la evaluación económica de un sinnúmero de sistemas, incluyendo los sistemas energéticos (Frangopoulos y Carilis, 1996).

5.2.3.6 Árbol General de Dependencia de Variables.

La gran cantidad de variables es que intervienen en la definición de las funciones anteriores y sus interrelaciones provocan confusiones e imprecisiones a la hora de definir las mismas. En la Figura 5.8 se puede apreciar un árbol de dependencia comúnmente aceptado, sobre todo en la zona de dependencias lineales. La zona de realimentación es más polémica y no se considerará por ahora en este estudio.

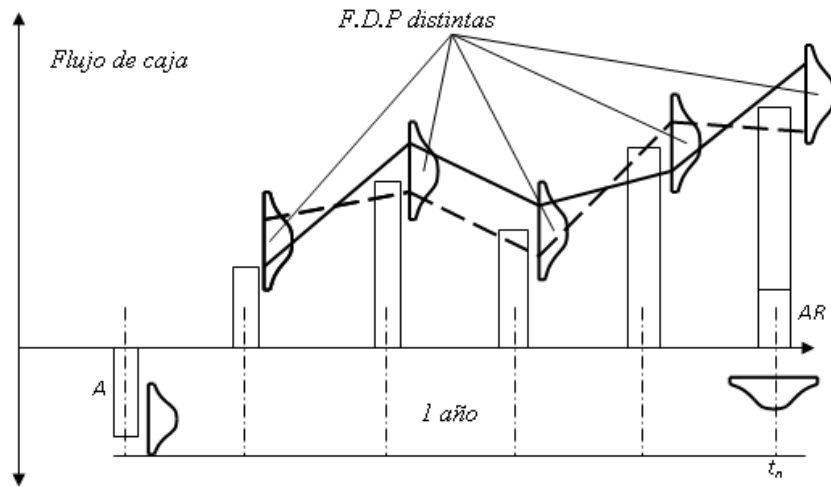


Figura 5.8. Proceso de solución discreto

El proceso general de simulación que se pretende seguir es el de simular los valores de las funciones presentes en la Figura 5.9. A continuación se esquematiza el proceso para el caso resorte discreto.

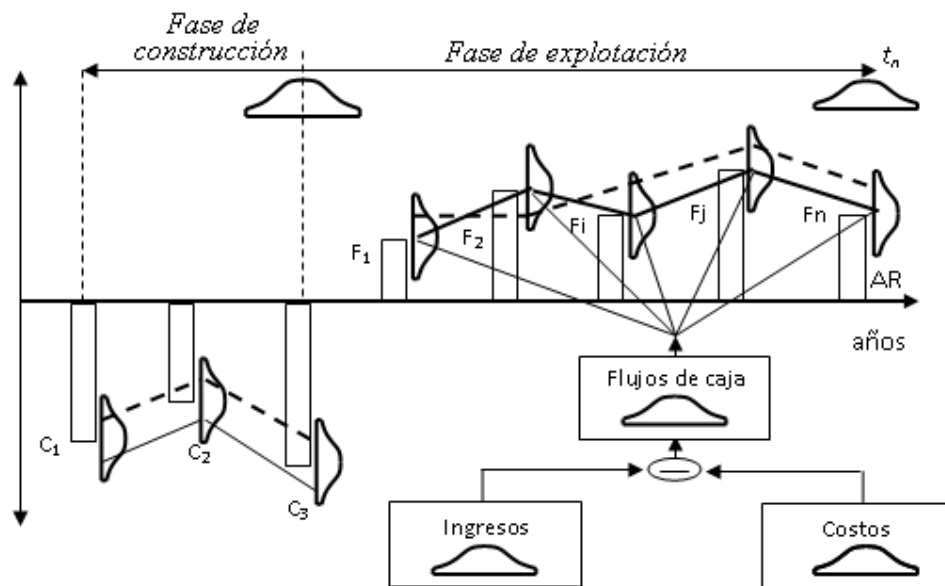


Figura 5.9. Proceso general de la simulación

Como se muestra en la Figura 5.9, tanto los costos como los ingresos pueden estar sujetos a funciones de probabilidad que dependen en gran medida a las condiciones del medio donde se desarrolle el proyecto energético, por tanto estos deben ser tratados como tal. En la siguiente sección se hace una descripción detallada de los modelos de incertidumbre existentes y se establece el modelo requerido para el análisis de sistemas energéticos.

El método de Montecarlo consiste en realizar una simulación utilizando números aleatorios, para determinar el comportamiento futuro de una variable aleatoria. La aplicación del método de Montecarlo Dirigido consiste en combinar los números aleatorios obtenidos, con la función que represente la distribución de frecuencias de las variaciones históricas de la variable, siguiendo los siguientes pasos:

1. Especificar las variables y objetivos del modelo.
2. Estimar la distribución de probabilidad que explica el comportamiento de las variables aleatorias no controladas del modelo.
3. Calcular las probabilidades acumuladas de cada una de las variables.
4. Generar un número aleatorio.
5. Vincular el número aleatorio con las variables cuya probabilidad acumulada sea menor o igual al número aleatorio obtenido.
6. Repetir el proceso un elevado número de veces, hasta obtener el número deseado de valores muestrales.
7. Realizar con las variables obtenidas las operaciones especificadas en el modelo.
8. Analizar las funciones de distribución de las variables objetivo obtenidas con las operaciones indicadas, como herramienta para la toma de decisiones.

5.3 Métodos de Solución Simulación+Optimización

El acoplamiento de la simulación con la optimización de un sistema energético bajo incertidumbre, se presenta en la Figura 5.10, en la que se señalan las principales características del método, en la cual se observa el NSGA-II como un método de construcción automática y de distribución uniforme de los puntos que conforman la curva de Pareto (Deb, 2002) para un problema de optimización de múltiples objetivos en reemplazo del método de las ponderaciones empleados en los capítulos 3 y 4 de este trabajo; adicionalmente se incluye un método de selección de una alternativa no dominada Multicriterio y Multiatributo, conocida como TOPSIS, la cual se basa en el concepto de distancia euclidiana. A continuación repasaremos estas dos metodologías brevemente.

5.3.1 Algoritmo Evolutivo para Optimización Multiobjetivo (MOEA)

En los capítulos anteriores, se abordó este tema contextualizados en una metodología simple que no permite analizar la inmensidad de puntos a lo largo de la frontera de óptimos de Pareto, solo se estructuraba algunos puntos considerando factores ponderados aplicados a las funciones objetivo. En este sentido, la

información obtenida no es suficiente, pudiendo generar un riesgo en la toma de decisiones en la escogencia final del óptimo, por lo tanto en esta sección se acude a los métodos de optimización multiobjetivo aplicados a los problemas de mayor complejidad (Deb, 2002).

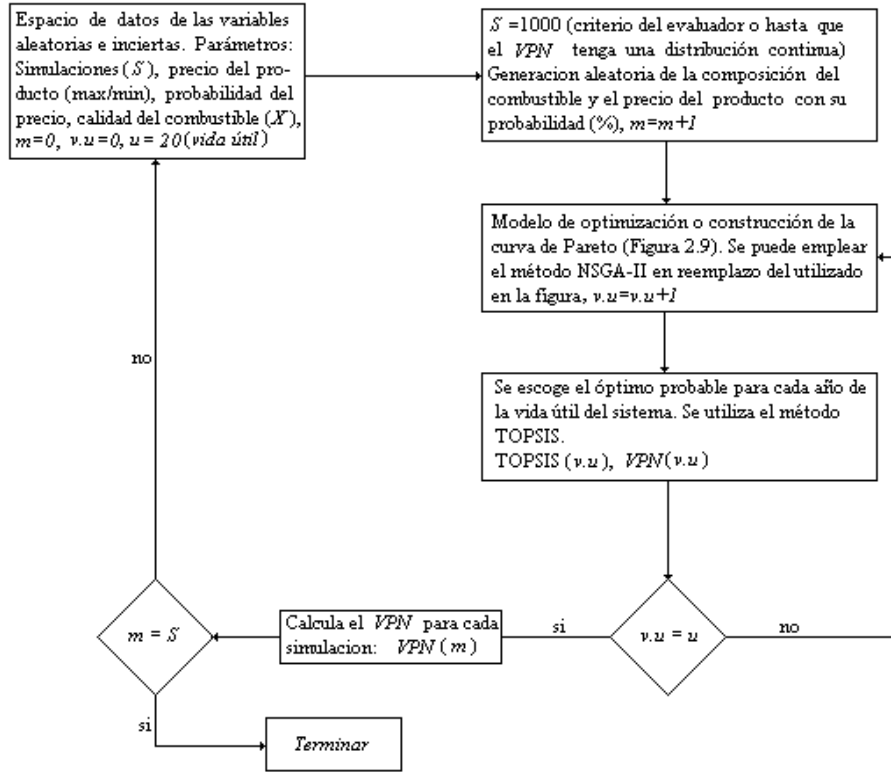


Figura 5.10 Modelo de Simulación+Optimización

Los algoritmos evolutivos (EAs) cuya esencia son los mecanismos de selección natural, han adquirido gran popularidad por ser métodos robustos y efectivos para resolver problemas de optimización (<http://www.fing.edu.uy/>). Inicialmente se empleaban para resolver problemas de una única función objetivo, pero su gran capacidad de adaptación y la posibilidad de mejorar la estructura para hacerlos más efectivos condujo a que los algoritmos evolutivos fueran utilizados para resolver problemas de múltiples objetivos con alta complejidad. Las técnicas tradicionales basadas en gradientes o programación determinística, resultan ineficaces frente al reto de resolver problemas de optimización multiobjetivo con un espacio de soluciones mucho mayor al de un problema de optimización monoobjetivo. Los algoritmos evolutivos para optimización multiobjetivo, provienen de los algoritmos evolutivos aplicados en problemas de un solo objetivo y por lo tanto su estructura general es muy parecida (ver Figura 3.9).

De acuerdo a Coello et al. (2002), la capacidad de los EAs para resolver problemas con múltiples objetivos fue sugerida en la década de 1960 por Rosenberg, pero hasta mediados de la década de 1980 no se presentó la implementación de un algoritmo evolutivo para optimización multiobjetivo. A

partir de la década de 1990 fueron realizadas una gran cantidad de propuestas de MOEAs, formándose una comunidad de investigadores en el área que trabaja activamente en la actualidad. El MOEA se diseña para dos propósitos simultáneos: lograr buenas aproximaciones en las fronteras de Pareto y mantener la diversidad de las soluciones, de modo de muestrear adecuadamente el espacio de soluciones y no converger a una solución única o a una sección acotada del frente, presentando como deferencia a los EAs, el Operador de diversidad utilizado para evitar la convergencia a un sector del frente de Pareto (nichos, función de aptitud-fitness, repartimiento-sharing, apiñamiento-crowding, etc.) y asimismo, incluye un procedimiento de Asignación de función de aptitud, orientado a brindar mayor chance de perpetuarse a aquellos individuos con mejores características, considerando los valores de las funciones objetivo y los resultados de la métrica utilizada para evaluar la diversidad.

El Algoritmo NSGA-II

El algoritmo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, versión II) fue presentado por K. Deb y sus colegas del Laboratorio de Algoritmos Genéticos del Instituto Tecnológico Kanpur en India en el año 2000 (Deb et al., 2000). Surgió como una versión mejorada del algoritmo NSGA (Srinivas y Deb, 1994), de quién heredó su estructura principal, pero incluyendo características distintivas para resolver tres aspectos fuertemente criticados en la comunidad de investigadores sobre el NSGA: el ordenamiento no dominado, la ausencia de elitismo y la dependencia del parámetro σ para aplicar la técnica de sharing. Las características principales del algoritmo NSGA-II abarcan:

- El ordenamiento no-dominado elitista mediante una técnica de comparación que utiliza una subpoblación auxiliar, que le permite disminuir la complejidad de los chequeos de dominancia de $O(MP^3)$ a $O(MP^2)$, siendo M el número de funciones objetivo y P el tamaño de la población utilizada.

```

Inicializar(P(0))
generacion = 0
Evaluar(P(0))
mientras (no CriterioParada) hacer
    R = Padres  $\cup$  Hijos
    Frentes = Sorting No Dominado(R)
    NuevaPop =  $\emptyset$ 
    i=1
    mientras |NuevaPop| + |Frentes(i)|  $\leq$  sizepop
        Calcular Distancia de Crowding (Frentes(i))
        NuevaPop = NuevaPop  $\cup$  Frentes(i)
        i++
    Sorting por Distancia (Frentes(i))
    NuevaPop = NuevaPop  $\cup$  Frentes(i)[1:(sizepop - |NuevaPop|)]
    Hijos = Seleccin y Reproduccion(NuevaPop)
    generacion ++
    P(generacion) = NuevaPop
retornar Mejor Solucion Hallada

```

Tomado de: <http://www.fing.edu.uy/>

Figura 5.11. Esquema del Algoritmo NSGA-II

- La preservación de diversidad mediante una técnica de crowding que no necesita especificar parámetros adicionales
- La asignación de valores de fitness en base a los niveles o rangos de no dominancia, se hereda del NSGA-II original, aunque se considera en el procedimiento de asignación los valores de distancia (crowding) utilizados para evaluar la diversidad de las soluciones.

La figura 5.11 presenta un esquema del algoritmo NSGA-II, basado en la descripción de Deb et al. (2002). Pueden apreciarse los operadores mencionados, utilizados para el ordenamiento no dominado, evaluación de la diversidad mediante la técnica de crowding y asignación de fitness.

5.3.2 Toma de Decisiones Multicriterio

El método de NSGA-II entre otros métodos de optimización multiobjetivo, pueden generar un número considerable de soluciones óptimas, por lo tanto la elección de una solución entre tantas alternativas constituye todo un desafío que puede ser abordado desde la teoría de toma de decisiones Multicriterio (Glosario Multicriterio). Uno de los métodos de mayor utilidad para la escogencia de una alternativa optima de entre varias es el TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), el cual también es conocido como Programación por Compromiso.

El TOPSIS es una técnica de programación matemática utilizada originalmente en contextos continuos y que ha sido modificada para el análisis de problemas Multicriterio de tipo discreto. Es utilizada para identificar soluciones que se encuentran lo más cerca posible a una solución ideal aplicando para ello alguna medida de distancia. Las soluciones así identificadas se denominan soluciones compromiso y constituyen el conjunto de compromiso. Esta técnica está basada en el concepto que una alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta posible hacia la solución ideal positiva y estar lo más lejos posible respecto de la solución ideal negativa. Fue desarrollada por Hwang y Yon en 1981, recibiendo posteriores aportes de Zeleny (1982), Hall (1989). Fue mejorada por los propios autores en 1987 y más tarde conjuntamente con Lai y Liu en 1993.

Una solución ideal se define como una colección de niveles ideales (o de puntajes) en todos los atributos considerados, pudiendo suceder que tal solución normalmente sea inalcanzable o que sea no factible. Esta noción se basa en la idea que el logro de tal meta se encuentra en la racionalidad de la elección humana. El vector compuesto por los mejores valores del j -ésimo atributo respecto a todas las alternativas posibles es quien recibe el nombre de solución ideal positiva. En contraposición, la solución ideal negativa estaría dada por el vector que contiene los peores puntajes alcanzables en los atributos.

De este modo puede ocurrir que una alternativa seleccionada desde el punto de vista de su más corta distancia respecto de la solución ideal positiva deba competir con otra alternativa que se encuentra lo más lejos posible de la solución

ideal negativa. Por ello, y a fin de definir la solución ideal, el método TOPSIS define un índice de similitud (o de proximidad relativa) que se construye combinando la proximidad al ideal positivo y la lejanía respecto al ideal negativo.

El método se desarrolla en una serie de etapas, iniciando con una serie de alternativas j denotadas como A_1, A_2, \dots, A_j . Para la alternativa A_j la clasificación del i -ésimo criterio (objetivo) se denota por f_{ij} , es decir que f_{ij} es el valor de la función objetivo para la alternativa A_j ; también se denota a n como la cantidad de objetivos. Las etapas a seguir son las siguientes:

i) Se calcula la matriz de decisión normalizada, con lo que se obtiene el valor de r_{ij} , el cual se calcula como sigue:

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^k f_{ij}^2}}, \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad y \quad j = 1, 2, 3 \dots k \quad (5.6)$$

ii) Luego se calculan los puntajes normalizados ponderados de la matriz de decisión. Los puntajes normalizados v_{ij} , se calculan así:

$$(5.7)$$

$$v_{ij} = w_i * r_{ij}, \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad y \quad j = 1, 2, 3 \dots k$$

Donde w_i es el peso para el atributo o criterio (objetivo) i -ésimo y $\sum_{i=1}^n w_i = 1$; generalmente los pesos se escogen iguales para cada atributo (Li et al., 2009).

iii) se identifican y/o definen las soluciones ideal positiva e ideal negativa del problema bajo análisis, en términos de los valores normalizados ponderados:

$$\begin{aligned} A^+ &= \{v_1^+, \dots, v_i^+\} = \left\{ \left(\max_j v_{ij} | i \in I' \right), \quad \left(\min_j v_{ij} | i \in I'' \right) \right\} \\ A^- &= \{v_1^-, \dots, v_i^-\} = \left\{ \left(\min_j v_{ij} | i \in I' \right), \quad \left(\max_j v_{ij} | i \in I'' \right) \right\} \end{aligned} \quad (5.8)$$

iv) Se calculan las medidas de separación o distancia a las soluciones ideales entre las alternativas, mediante alguna noción de distancia métrica, que puede ser la euclidiana. Cualquiera sea la noción de distancia utilizada, esta se calcula respecto a la solución ideal positiva y respecto a la solución ideal negativa:

$$D_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^*)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (5.9)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, k$$

v) Finalmente se construyen las semejanzas a la solución ideal positiva como índice respecto a la solución ideal negativa, lo que implica que dicho índice combina los dos aspectos o metas definidos al principio.

$$CC_j^* = \frac{D_j^-}{D_j^* + D_j^-}, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (5.10)$$

El ordenamiento por preferencia de las soluciones surge de colocar las alternativas en orden decreciente respecto a las semejanzas estimadas en v) ya que el más alto valor representa aquella alternativa que se encuentra más cerca del ideal positivo en relación a la distancia respecto al ideal negativo.

5.3.3 Generalidades sobre la Incertidumbre

El principal elemento para la toma de decisiones es la información, por consiguiente se hace necesaria tanto para describir problemas y formular modelos asociados como para evaluar y predecir el desempeño de los sistemas y su interacción con el ambiente que le rodea, es decir para analizar la calidad de las alternativas de solución. En este sentido, no es suficiente la cantidad de información que se tenga para tomar buenas decisiones, es importante también la calidad de la misma, de donde se puede asociar la imperfección o defecto de la información al término conocido como 'incertidumbre'. Con lo anterior queda claro que la información puede presentar debilidades por defectos de cantidad (ausencia y carencia), de calidad (irrelevancia, ambigüedad, inconsistencia, etc.) o ambos (Salazar, 2008). El análisis de la incertidumbre requiere de mucho análisis e interpretación desde la misma recolección de la información hasta la obtención de los resultados, por lo que se trata de un tema de alta complejidad que ha sido objeto de rigurosos estudio en los últimos años, en cada etapa del proceso de manejo de la información (Heinrich et al., 2007). El trabajo realizado por Salazar (2008) muestra con claridad y en detalle los diferentes tipos de incertidumbre y la forma de manejarse según sea el caso de su procedencia, pero siguiendo un proceso general para cualquier caso en el que se identifican algunas frases claves, tal como se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Palabras claves para analizar la incertidumbre (Salazar, 2008)

Palabras clave	Preguntas	Objetivo
¿Qué? Información	¿Qué se requiere?	Obtener información, o de forma equivalente, reducir la incertidumbre
¿Para qué? Propósito	¿Para qué se requiere?	Utilidad de la información
¿Obtenible? Naturaleza	¿Se puede obtener la información?	Naturaleza de la incertidumbre
¿Reducible? Precio	¿Es reducible la incertidumbre?	Precio de la información
¿De dónde? Fuentes	¿De dónde viene la incertidumbre?	Fuentes de incertidumbre
¿En dónde? Influencia	¿En dónde se afecta al sistema de incertidumbre?	Relaciones sistémicas, entrada-sistema-salida

La reflexión sobre el conocimiento forjado sobre las bases de la experiencia y la información es fundamental para contextualizar la incertidumbre, en la medida que la ignorancia es un defecto del conocimiento y la incertidumbre un defecto objetivo (real) en la información. Desde un punto de vista práctico, la información es el producto de investigar '¿qué se requiere?', en término de datos o evidencias, para diseñar, analizar, conocer, construir u operar un sistema, sea cual fuere, mientras que la incertidumbre surge como resultado de las imperfecciones en las distintas operaciones realizadas sobre dicha información (ver Tabla 5.2). De este modo, los errores de medición producen una incertidumbre métrica, las limitaciones para poseer información plena sobre el futuro o el pasado genera una incertidumbre temporal, la dificultad práctica de considerar todos los datos y las interacciones entre variables cuando modelamos un sistema da paso a una incertidumbre estructural, mientras que finalmente la multitud y variedad de categorías conceptuales, aunado a la imperfección en los medios de transmisión y decodificación, da como resultado una incertidumbre interpretativa o comunicativa. Es por tanto de vital importancia, en primera instancia y de cara a la toma de decisiones, realizar de la mejor manera posible las siguientes tareas:

1. Recolectar la mayor cantidad posible de información (datos),
2. Identificar las clases de imperfecciones asociadas con dicha información,
3. Encontrar modos adecuados de representar la incertidumbre, y finalmente
4. Minimizar el efecto de dicha incertidumbre sobre el proceso de decisión, y si es el caso, sobre la alternativa implementada.

La incertidumbre de tipo I, también llamada aleatoriedad, incertidumbre sistémica o variabilidad, está caracterizada por no poder ser reducida mediante la obtención de nuevas evidencias. Es por ejemplo el caso de una variable aleatoria cuya distribución ya es conocida, por lo cual nuevos datos sobre los valores que ha tomado la variable no aportan nada para conocer el próximo valor que ha de tomar. Por otro parte, la incertidumbre de tipo II, también llamada reducible o epistémica, se caracteriza por poder ser reducida mediante la obtención de nueva información acerca del sistema de interés o el ambiente que le rodea. La diferencia en la naturaleza de ambos tipos tiene implicaciones importantes en la práctica, que se reflejan tanto en la dificultad de procesar adecuadamente la

incertidumbre epistémica como en el tipo de inferencias o conclusiones que pueden hacerse frente a la presencia de uno u otro tipo.

Tabla 5.2. Diversas Aplicaciones de la Incertidumbre

Tipo de operación	Actividad o método	Tipo de incertidumbre	Información fundamental
Obtención de información (Recopilación de datos)	Medición Investigación Observación	Métrica	Nuevas mediciones Mediciones almacenadas Descripciones
Obtención de información (Minería de datos)	Predicción Retrodicción	Temporal	Futuro Pasado
Asociación de la información (Relacionar datos)	Modelado	Estructural	Complejidad
Transmisión de información (Mediante el lenguaje)	Comunicación y descripción	Interpretativo	Conceptos, metas y valores

Nótese que, independientemente de la naturaleza de la incertidumbre, la obtención de información tiene un coste que, en algunos casos, puede superar al coste en que podemos incurrir como consecuencia de no poseer más información. Por ello es necesario considerar el precio de la información para definir hasta qué punto conviene o no seguir recolectando datos.

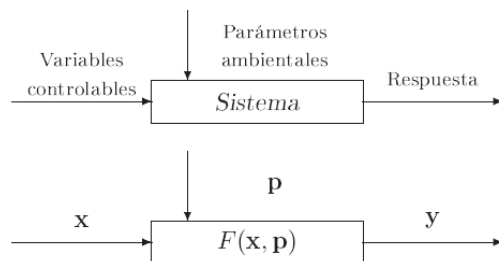


Figura 5.12 Visión sistémica de las instancias y fuentes de incertidumbre: el sistema (arriba) y su representación funcional (abajo) (Salazar, 2008)

Finalmente, es de capital importancia analizar en dónde afecta la incertidumbre, para evaluar sus consecuencias. Considérese el sistema representado en la Figura 5.12, el cual es modelado mediante una función $F(x, p)$ tal que x denota el conjunto de variables y p el conjunto de parámetros ambientales. Los vectores x y p representan por tanto la totalidad de elementos, a ser considerados por quien modela al sistema, que alimentan o influyen sobre este último. La respuesta del sistema ante dichos elementos está representada por el vector de atributos y . La incertidumbre procede de muchas fuentes, siendo el poder descriptivo del modelo una de las más importantes. La complejidad de $F(x, p)$ en términos del número de variables, parámetros y relaciones consideradas, es un punto fundamental en el análisis de incertidumbre. Otro factor de gran relevancia es la instancia afectada por la incertidumbre, la cual puede estar asociada a las variables (x), al ambiente

(p), al propio sistema o al método que utilizamos para evaluarlo. Así, si el sistema está adecuadamente modelado, al menos todas las entradas importantes al sistema deberán estar contenidas en x . Algunas variables pueden haber sido convenientemente evitadas por razones prácticas o ignoradas por errores de modelado. Por otra parte, siempre existen interacciones incontrolables dentro del sistema o con su medio ambiente, que han de ser consideradas durante la construcción del modelo.

La evaluación de la respuesta y está sujeta a dos instancias de incertidumbre, que son la calidad del modelo $F(x)$ y la idoneidad de los cálculos. Algunos errores en los algoritmos y/o códigos de computación o en los modelos de simulación son fuente de incertidumbre epistémica. Del mismo modo, las mediciones de x y p suelen estar sujetas a algún tipo de incertidumbre epistémica, debido a las limitaciones inherentes y a las incorrecciones en nuestros métodos y aparatos de medición. Adicionalmente, la aleatoriedad que procede del ambiente, falta de homogeneidad en los materiales, fluctuaciones en el tiempo y espacio, etc., debe ser considerada y correctamente modelada.

5.4. DESCRIPCION GENERAL DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACION

A medida que se desarrolla este capítulo, se iban presentando los principales conceptos y métodos utilizados para optimizar un sistema energético que al considerar factores externos, incluye variables aleatorias e inciertas. Esta forma de abordar el problema de optimización de sistemas energéticos, conduce a desarrollar una metodología diferente a las utilizadas hasta ahora, reportando adicionalmente, información detallada de aspectos globales que pueden ser vitales en la toma de decisiones.

El problema general de optimización quedaría de la siguiente manera:

Maximizar $\varepsilon_{PH} = f(p_P, c_F, X_i) \rightarrow$ (ecuación 4.1)

Minimizar $C_T = f(X_i, Z_i) \rightarrow$ (ecuación 5.16)

Minimizar $m_R = f(X_i, Y_{R,i}) \rightarrow$ (ecuación 4.6)

Sujeto a las restricciones descritas en el apartado 5.1.1 a 5.1.3 de este capítulo. En las secciones 4.2 a 4.3, se estudian los conceptos teóricos y metodológicos para la optimización del sistema energético, el cual tiene para cada equipo (k), la representación termoeconómica con las Ecs. 5.11 a 5.15 (Padilha, 2009).

$$Z_{CA} = \left(\frac{39.5\dot{m}_a}{0.9 - \eta_{CA}} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (5.11)$$

$$Z_{CC} = \left(\frac{25.6\dot{m}_a}{0.995 - (P_4/P_3)} \right) [1 + \exp(0.018T_4 - 26.4)] \quad (5.12)$$

$$Z_{TG} = \left(\frac{266.3\dot{m}_g}{0.92 - \eta_{TG}} \right) \ln \left(\frac{P_4}{P_5} \right) [1 + \exp(0.036T_4 - 54.4)] \quad (5.13)$$

$$Z_{PR-A} = 2290 \left[\frac{\dot{m}_g(h_5 - h_6)}{U(MLTD)} \right]^{0.6}, \quad U = 0.018kW/(m^2 \cdot K) \quad (5.14)$$

$$Z_{HRSG} = 3650 \left[\left(\frac{\dot{Q}_{PR}}{MLTD_{PR}} \right)^{0.8} + \left(\frac{\dot{Q}_{EV}}{MLTD_{EV}} \right)^{0.8} \right] + 11820\dot{m}_s + 658\dot{m}_g^{1.2} \quad (5.15)$$

Con lo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$C_T = \sum_{j=1}^n \left(\tau \cdot \dot{m}_T \sum_{i=1}^m X_i \cdot c_{Fi} \right) \cdot (P/F, k, j) + \sum_{k=1}^{eq} (Z_k + Z_k^{O\&M}) \quad (5.16)$$

Donde,

$$\frac{P}{F}, k, j = \frac{F_j}{(1+k)^j}$$

Donde eq es el número de equipos del sistema y n los años de vida útil o de evaluación del sistema. El proceso de optimización se desarrolla con los siguientes pasos:

Paso 1. Se escogen valores para el precio del producto con una probabilidad (Pb) que depende de la función de distribución de los datos históricos (incertidumbre tipo I) y un número aleatorio (NA). El valor del precio al ser una variable incierta, entonces se generan n (un valor muy grande, por ejemplo 1000) valores del precio del producto por el método de Montecarlo, teniendo así una serie sintética de posibles valores del precio del producto. Las relaciones a considerar son las siguientes:

$$p_P = \begin{cases} p_{P_1} + (p_{P_2} - p_{P_1}) \cdot NA_1' & si \quad x_1 \leq NA_1 < x_2 \\ \vdots & \vdots \\ p_{P_{i-1}} + (p_{P_i} - p_{P_{i-1}}) \cdot NA_i' & si \quad x_{i-1} \leq NA_{i-1} \leq x_i \end{cases} \quad (5.17)$$

Donde $NA_i' = (NA_{i-1} - x_{i-1})/(x_i - x_{i-1})$, $i = 1, 2, \dots, S$ y S corresponde a las simulaciones realizadas o igual cantidad de precios generados. Como los datos históricos son generados con una probabilidad, entonces los números aleatorios deben tener relación con esta, de tal manera que los intervalos de precios con mayor frecuencia deben tener mayor probabilidad de ser escogidos en la simulación. En la Tabla 5.3, se relacionan los valores de los intervalos de precios con su frecuencia, probabilidad relativa y probabilidad acumulada, tomados de la Figura 5.2.

Tabla 5.3. Distribución de frecuencias y probabilidades del precio del producto

$p_{P_{i-1}} - p_{P_i}$	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Probabilidad (%)	Probabilidad acumulada
59.1 - 64	8	8	13.56	13.56
64.1 - 69	9	17	15.25	28.81
69.1 - 74	10	27	16.95	45.76
74.1 - 79	8	35	13.56	59.32
79.1 - 84	8	43	13.56	72.88
84.1 - 89	6	49	10.17	83.05
89.1 - 94	2	51	3.39	86.44
94.1 - 99	2	53	3.39	89.83
99.1 - 104	4	57	6.78	96.61
104.1 - 109	1	58	1.69	98.31
109.1 - 114	0	58	0.00	98.31
114.1 - 119	0	58	0.00	98.31
119.1 - 124	0	58	0.00	98.31
124.1 - 129	1	59	1.69	100.00
Totales	59		100.00	

De esta forma, la aparición de un número aleatorio está relacionada con una probabilidad y esta a su vez con el precio del producto. Por ejemplo, para un número aleatorio ubicado entre el rango de 0.000 y 0.1356, tendrá un precio entre 59.1 y 64 pesos, y el valor establecido del precio para la simulación se obtiene de la Ec. 5.17.

Paso 2. El algoritmo de optimización NSGA-II, descrito anteriormente y que puede usarse para el caso de tener múltiples objetivos y funciones no lineales, establece valores aleatorios para la población inicial correspondiente a las variables de decisión. Con estos valores y el precio simulado como un valor determinista para cada simulación, se alimentan las ecuaciones del modelo de optimización, guardando los límites establecidos por las restricciones, tantas veces como generaciones se hayan estipulado. Se debe tener en cuenta que el precio del producto sólo cambia en cada simulación, mientras que el resto de las variables de decisión cambian aleatoriamente en la población inicial y a partir de los valores obtenidos se evalúa la dominancia para cada iteración a partir de cada función objetivo, se asigna la probabilidad de ser padres para la próxima generación, se crea la próxima generación por cruzamiento y mutación de los individuos y nuevamente se evalúa la dominancia para cada iteración a partir de cada función objetivo y así sucesivamente para hasta completar las generaciones; luego se simula un nuevo precio para que ingrese y repetir el proceso hasta completar las simulaciones que permitan al evaluador demarcar la tendencia probabilística; lo anterior describe un algoritmo de optimización anidado dentro de un algoritmo de simulación. Es importante tener en cuenta que el manejo de las restricciones por el algoritmo, se pueden salir de los límites de operación; esto hace necesario la reparación de las restricciones de la siguiente manera:

a. La suma de las fracciones de cada combustible que interviene en la mezcla debe ser uno, cuando no se cumple esta condición, es decir que $\sum X_i \neq 1$, entonces se

utiliza la ecuación 4.18 que repara los casos de composición de mezclas por fuera de la condición.

$$X_i^* = \frac{X_i}{\sum_i^n X_i} \quad (5.18)$$

En la Ec. 4.18, X_i^* es la fracción reparada del combustible i , en una mezcla de n combustibles.

b. En las otras variables de decisión, la reparación se escoge con respecto a la cercanía a los límites de las variables, esto es si $Vd > Vd_{max}$ entonces $Vd^* = Vd_{max}$, donde Vd^* es la nueva variable de decisión que repara a Vd ; de igual manera, si $Vd < Vd_{min}$ entonces $Vd^* = Vd_{min}$, donde Vd^* es la nueva variable de decisión que repara a Vd .

En resumen, con el NSGA-II se obtiene una frontera de Pareto para cada valor del precio evaluado. De cada frontera se elegirá la solución A_i representativa del escenario del precio p_i mediante el método TOPSIS, considerando pesos de importancia relativa iguales para los diferentes objetivos. El método TOPSIS tiene un desarrollo sencillo que se puede incluir en el modelo de optimización o utilizar confiablemente del software gratuito para fines académicos ofrecido por la página de internet, <http://hackelare.wordpress.com/2009/11/25/metodo-topsis-soporte-para-la-toma-de-decisiones/>, el cual desarrolla el TOPSIS en tres pasos:

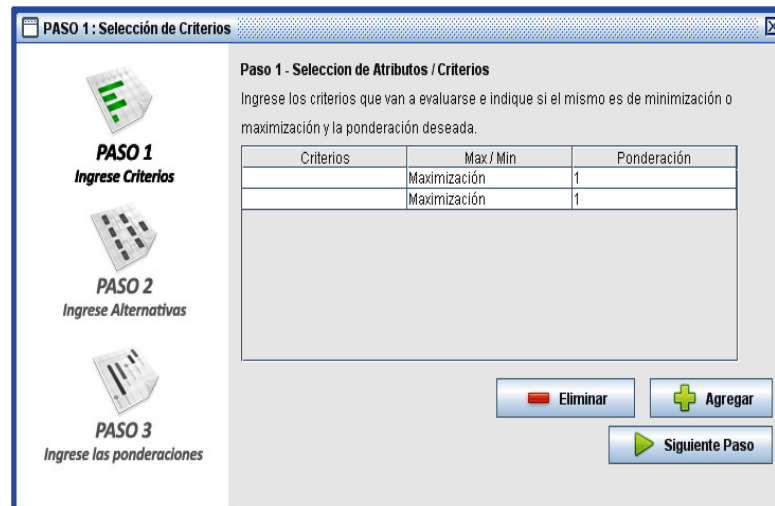


Figura 5.13. Primer Paso para Utilizar el Software TOPSIS.

- a) Se ingresan los criterios con los que se van a evaluar las alternativas en los recuadros que libres que aparecen en la Figura 5.13. Se indica si se desea maximizar (lo más posible) o minimizar (los menos posible, como el precio) y un peso, éste permite que el software preste más atención a los criterios con mayor peso dándole más importancia.

- b) Se ingresan las alternativas que tenemos, para el ejemplo de la Figura 5.14, son A1 y A2. Para el caso de estudio es la cantidad de puntos construidos en la frontera de Pareto, teniendo en cuenta que cualquiera de esos puntos es un óptimo y tienen la posibilidad de ser escogidos por el evaluador.

Figura 5.14. Segundo Paso para Utilizar el Software TOPSIS

- c) Se rellenan los datos de cada una, se hace en forma de tabla, para que a cada alternativa, en los recuadros libres de la Figura 5.15. Cuando se terminó de completar, se puede Resolver el problema directamente.

Criterio / Alternativa	A1	A2
Termoeconómico		
Tecnológico		

Figura 5.15. Tercer Paso para Utilizar el Software TOPSIS

Paso 3. Se repite el proceso para la cantidad de años de vida útil establecidos y se calcula el VPN con resolución discreta para cada alternativa escogida por TOPSIS de las curvas de óptimos de Pareto en cada simulación del precio.

Al terminar la simulación + optimización se cuenta con n soluciones óptimas para cada uno de los n escenarios (o valores de p simulados), respectivamente. Cada una de estas n soluciones A_i es óptima para el valor p_i evaluado pero no para los otros escenarios de valores p .

Paso 4. Para valorar, en forma general, las alternativas respecto a los objetivos bajo incertidumbre k (en nuestro caso, solo la eficiencia potencial de ingresos), se evaluará el desempeño de las n alternativas “óptimas” encontradas. Para ello, en cada uno de los objetivos que dependan de p , se forma una matriz $n \times n$, tal que el termino F_{ij}^k de la matriz del objetivo k , es el valor resultante de evaluar la alternativa A_i en la función del objetivo k , usando el precio p_j . Esta matriz mostrará el desempeño de implementar cada una de las alternativas i en todos los n escenarios evaluados, respecto al objetivo k (en nuestro caso solo eficiencia potencial de ingresos).

Paso 5. Para cada uno de los objetivos bajo incertidumbre (que dependen del valor de las variables inciertas, en nuestro caso solo p), se evaluarán uno o varios criterios de incertidumbre como: Valor esperado, Arrepentimiento, β -robustez, Maxi-min (si se está maximizando, Mini-max en caso contrario), Maxi-max (si se está maximizando, Mini-min en caso contrario), etc. Es útil usar varios criterios de incertidumbre para garantizar que la alternativa seleccionada no sea muy sensible al criterio elegido; es decir, que una alternativa puede tener muy buen valor esperado pero mucho arrepentimiento, por ejemplo. Es de anotar que, en este caso, los escenarios deben considerarse equiprobables $1/n$, ya que la probabilidad asociada a cada p_i ya se consideró al ser estos elegidos mediante un método Montecarlo y en este, los precios con mayor probabilidad muy seguramente fueron seleccionados con mayor frecuencia que los precios con menor probabilidad, aportando a su vez mayor número de alternativas i a evaluar.

Paso 6. El problema Multiobjetivo (en el caso en que se usen los criterios Valor Esperado, Arrepentimiento, y Varianza) puede configurarse ahora como un problema Multiobjetivo de múltiples Jerarquías, como se representa en la Figura 5.16.

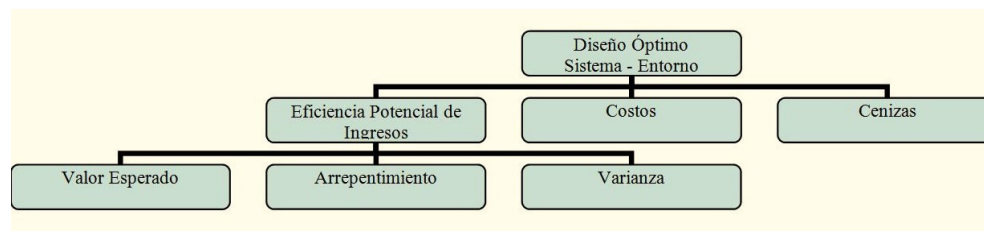


Figura 5.16. Modelo Jerarquizado del Problema Multiobjetivo con una Variable Incierta

La figura hace referencia a que el subproblema de la evaluación de la eficiencia potencial de ingresos es también un problema multiobjetivo de segunda jerarquía, por lo que puede resolverse por algún método Multicriterio, de los cuales hay alguno métodos aplicados a sistemas energéticos (Giannantoni et al., 2005), como el AHP (Analytic Hierarchy Process) (Jaramillo et al., 2003). Este método elegirá la mejor alternativa considerando los múltiples objetivos y la incertidumbre de los objetivos que dependen de las variables inciertas. En la siguiente subsección, se explica cómo se emplean dichos criterios de incertidumbre.

5.4.1. Criterios de Incertidumbre

Si se tienen las alternativas A_1, \dots, A_m y los posibles estados de la variable p_1, \dots, p_n (en nuestro caso $m=n=1000$); se asume que se conoce:

F_{ij}^k : Retorno cuando se considera la alternativa A_i y el estado de la variable es p_j en el objetivo k .

	p_1	p_2	\dots	p_n
A_1	F_{11}^k	F_{12}^k	\dots	F_{1n}^k
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
A_m	F_{m1}^k	F_{m2}^k	\dots	F_{mn}^k
$Pb[p]$	$Pb[p_1]$	$Pb[p_2]$	\dots	$Pb[p_n]$

Donde $Pb[p_j]$, es la probabilidad de ocurrencia del estado p_j . En nuestro caso $P[p] = 1/n$ para todos los escenarios.

5.4.1.1. Criterios para Caracterizar una Alternativa Bajo Riesgo

Los criterios bajo riesgo se clasifican en: a) ESPERANZA que se define como la respuesta promedio de una alternativa; b) VULNERABILIDAD, definida como la capacidad de una alternativa de soportar cambios predecibles de la variable aleatoria; c) ROBUSTEZ, la cual se define como la capacidad de una alternativa de soportar satisfactoriamente todos los posibles estados de la variable aleatoria.

a) Criterio de Esperanza: Este criterio selecciona la alternativa con mejor valor esperado de la siguiente manera:

$$E^k[A_i^*] = \text{Max}\{E^k[A_1], E^k[A_2], \dots, E^k[A_m]\} \quad (5.19)$$

Donde:

$$E^k[A_i] = \left[\sum_{j=1}^n Pb(p_j)(F_{ij}^k) \right]$$

Este criterio es adecuado solo si la variación de los beneficios a lo largo de los estados es pequeña. Para los casos en los que la variación de los beneficios sea alta, pueden ocurrir casos en que una decisión de inversión que sea óptima “en promedio” sea muy mala para uno o más estados específicos. Este criterio es insensible a la variación.

b) Criterios de Vulnerabilidad: estos criterios son muy útiles cuando se consideran posibles estados de la naturaleza críticos como sequías, guerras, etc.

Los criterios de vulnerabilidad más aplicados son:

- Las funciones de arrepentimiento
- Criterio Hurwicz: Criterios Maximin y Maximax

Las funciones de Arrepentimiento, compara cada alternativa ideal $F^{k-Max} = [F_1^{k-Max}, F_2^{k-Max} \dots F_n^{k-Max}]$, la mejor Alternativa es por tanto, la más cercana a esa referencia y corresponde a la de menor valor de:

$$\left\{ D^{kq}(A_i) = \left[\sum_{j=1}^e Pb(p_j) (F_j^{k-Max} - F_{ij}^k)^q \right]^{1/q} \right\}$$

donde F_j^{k-Max} es el valor ideal respecto al estado p_j (el mayor valor de la columna j). Las distancias a la alternativa ideal son llamadas “arrepentimientos” porque equivalen a los beneficios no obtenidos a causa de no conocer con certeza el estado futuro de la variable aleatoria.

El Criterio Hurwicz o Criterios maxi-min y maxi-max. En el Maxi-min el decisor actúa de manera pesimista y opta por la decisión que implique mayores beneficios para el peor de los casos de cada una de las alternativas. La mejor alternativa es la que tiene el mayor valor de:

$$\{D^{k*}(A_i) = \text{Min}_j(F_{ij}^k); j = 1, 2, \dots n\} \quad (5.21)$$

En el Maxi-max el decisor tiende a actuar de manera arriesgada por su exceso de optimismo. La mejor alternativa es la que tiene el mayor valor de:

$$\{D^{k**}(A_i) = \text{Max}_j(F_{ij}^k); j = 1, 2, \dots n\} \quad (5.22)$$

Maxi-min = criterio conservador

Maxi-max = arriesgado

c) Criterios de Robustez: una alternativa robusta en el futuro no requiere de transformaciones pues sus condiciones esenciales son:

- La insensibilidad
- Tolerancia ante cambios inesperados
- Actúa bien en la mayoría de los posibles estados de la naturaleza.

Pero suelen ser alternativas muy costosas

El Criterio b-robustez selecciona la solución más robusta, respecto a un nivel de aceptabilidad β , de la siguiente manera:

(5.23)

$$\left\{ R_{\beta}^k(A_i) = \sum_{j=1}^n Pb(p_j) \phi_{ij}^k \right\}$$

En la que β representa la máxima diferencia normalizada con respecto a la solución de referencia que se considera aceptable para el decisor. La función ϕ_{ij}^k es 1 si la alternativa i es aceptable en el estado j y corresponde a la función:

$$\phi_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si } F_{ij}^k = \frac{F_j^{k-Max} - F_{ij}^k}{F_j^{k-Max} - F_j^{k-Min}} \leq \beta \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$R_{i\beta}^k$ es la probabilidad de que los beneficios resulten aceptables para el decisor. Por ejemplo si $R_{i\beta}^k = 0.80$, la alternativa i tiene una probabilidad de 0.80 de estar en el rango aceptable para el decisor.

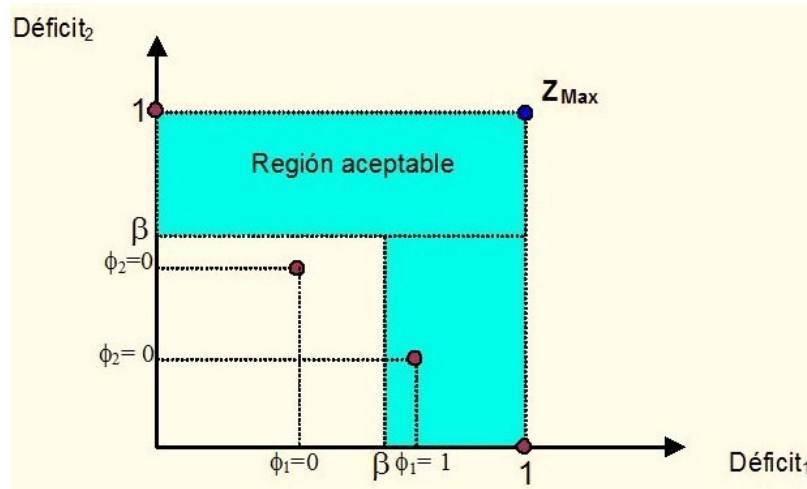


Figura 5.17. Ejemplo de Aplicación del Criterio de Robustez

d) El criterio de varianza hace referencia a la desviación al cuadrado de la alternativa i , con respecto al promedio de todas las alternativas. La función que define la varianza es la siguiente:

$$Va_j = \sum_{j=1}^n \frac{(F_j^{k-Prom} - F_{ij}^k)^2}{n} \quad (5.25)$$

De esta forma, el menor reporte de la varianza sería la mejor alternativa debido a que hace referencia a aquella que tiene menor dispersión de valores. En la Tabla 5.4, se muestra las ventajas y desventaja de algunos de los criterios explicados en esta sección.

Tabla 5.4. Ventajas y desventajas de los criterios de decisión

CRITERIO	VENTAJA	DESVENTAJA
MAXIMIN (Visión Pesimista)	Disminuye el riesgo asociado a escenarios malos	-No incorpora en la toma de decisión los escenarios favorables -No utiliza la distribución de probabilidades
MAXIMAX (Visión Optimista)	Decide en función de los escenarios favorables	-No incorpora en la toma de decisión los escenarios desfavorables -No utiliza la distribución de probabilidades
ARREPENTIMIENTO (Visión Neutral)	-Incorpora los escenarios favorables y desfavorables -Busca reducir el riesgo	-No distingue escenarios buenos y malos -No utiliza la distribución de probabilidades
VALOR ESPERADO (Visión de Largo Plazo)	-Incorpora la Ley de Probabilidades. -Muy bueno en problemas de toma de decisión que se repite muchas veces en el tiempo.	No incorpora medida de variabilidad de los resultados

5.5. RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores obtenidos de la simulación-optimización se consignaron en la Tabla 5.5, en la que se encuentran los modelos óptimos para los precios simulados por rango. Los valores de la parte superior de la Tabla 5.5 (filas 1 a 5), corresponden a las variables de decisión relacionadas con las condiciones de operación del sistema, el segundo grupos de valores (filas 6 a 14) corresponde a las variables de decisión relacionadas con la composición del combustible y el último grupo de valores (filas 15 a 19) son las funciones objetivo y los indicadores de la simulación. En el último grupo de valores se incluyó el costo total invertido durante el proyecto, con el fin de establecer si existía algún comportamiento en la optimización para precios altos o bajos del producto, todos los valores de este último grupo están en un rango de cero a uno, F_i por la Ec. 4.1 y los restantes se generan por la Ec. 5.26, donde i son las variables del último grupo de valores de la tabla, excluyendo F_i y V son los valores resultantes, correspondientes para cada intervalo de precios.

$$F_i = \frac{V_i - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (5.26)$$

Tabla 5.5 Resultados de la simulación a diferentes precios del producto

<i>Variables</i>	59,1-64 (\$/kWh)	64,1-69 (\$/kWh)	69,1-74 (\$/kWh)	74,1-79 (\$/kWh)	79,1-84 (\$/kWh)	84,1-89 (\$/kWh)	89,1-94 (\$/kWh)	94,1-99 (\$/kWh)	99,1-104 (\$/kWh)	104,1-109 (\$/kWh)	109,1-124 (\$/kWh)	124,1-129 (\$/kWh)
η_{GT}	0.765	0.878	0.858	0.725	0.725	0.702	0.703	0.701	0.875	0.837	-	0.879
η_{AC}	0.772	0.704	0.919	0.919	0.514	0.679	0.919	0.133	0.876	0.643	-	0.919
P_2/P_1	8.63	22.31	7.06	7.51	7.20	14.58	7.02	7.81	26.23	15.65	-	20.39
$T3 (K)$	917.53	906.14	702.28	739.93	701.65	709.65	707.72	786.34	933.50	886.33	-	984.03
$T4 (K)$	1157.24	1300.00	1300.00	1172.39	1110.10	1108.46	1114.74	1115.74	1300.15	1359.39	-	1488.31
X_1	0.128	0.002	0.122	0.224	0.000	0.000	0.000	0.103	0.040	0.194	-	0.078
X_2	0.040	0.307	0.125	0.002	0.406	0.000	0.000	0.005	0.211	0.187	-	0.140
X_3	0.027	0.029	0.125	0.149	0.000	0.000	0.000	0.031	0.464	0.077	-	0.054
X_4	0.448	0.007	0.125	0.115	0.000	0.000	1.000	0.281	0.121	0.125	-	0.317
X_5	0.237	0.073	0.128	0.478	0.594	0.524	0.000	0.540	0.063	0.070	-	0.008
X_6	0.098	0.032	0.125	0.002	0.000	0.476	0.000	0.032	0.027	0.014	-	0.146
X_7	0.006	0.148	0.125	0.022	0.000	0.000	0.000	0.002	0.012	0.147	-	0.054
X_8	0.017	0.400	0.125	0.007	0.000	0.000	0.000	0.006	0.063	0.186	-	0.205
$\sum X_i$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	-	1.000
F_1	0.875	0.803	0.521	0.808	0.727	0.665	0.800	0.931	0.876	0.873	-	0.924
F_2	0.02066	0.65429	0.06573	0.00573	0.00000	0.02577	0.00001	0.00528	0.68810	0.17027	-	1.00000
F_3	0.31074	1	0.57924	0.19378	0.7172	0.10119	0	0.16037	0.69453	0.72869	-	0.63592
$F_4 (CT)$	0.01003	0.72551	0.00004	0.04622	0.07743	0.05481	0	0.13724	0.6555	1	-	0.33738
$F_5 (VPN)$	0.00418	0	0.16445	0.23859	0.31449	0.39668	0.48264	0.54613	0.56503	0.60427	-	1

F_1 corresponde al potencial de ingresos, F_2 corresponde a los costos de inversión del sistema para las condiciones óptimas a un precio dado, F_3 son los residuos producto de la combustión basadas en el contenido de cenizas y azufre del combustible, F_4 son los costos totales durante la vida útil del sistema y F_5 es el VPN considerando costos e ingresos a una tasa de interés constante. Se observa en la tabla que el intervalo de precios del producto de mayor probabilidad de ocurrencia es el 69.1-74 pesos por kWh (columna 3), siguiendo el intervalo 64.1-69 (columna 2) y continuando con los intervalos 59.1-64 y 74.1-79 (columnas 1 y 5, respectivamente) con la misma probabilidad. En estos intervalos se encuentran los diseños más robustos y están sesgados al límite inferior del precio, de tal manera que los diseños de las columnas del lado izquierdo pueden soportar con mayor resistencia cambios en los precios del producto que los diseños de las columnas de la derecha. Por otra parte, hay varios diseños con relación de presión (P_2/P_1) que se deben descartar porque físicamente están por encima de los límites físicos (columna 2, 9 y la última), cuyos valores no deben superar una relación 15 a 1.

Una observación importante, es que la calidad del producto es mayor para los arreglos con mayores intervalos de precios (X_5 y X_6 – carbones del Cesar y la Guajira, respectivamente), lo que quiere decir, que para el caso de una configuración de precios altos del producto, hace factible la ubicación de un sistema de generación en el Cesar o la Guajira, mientras que para los casos donde se presenta precios bajos en el producto, se puede ubicar el sistema en otra de las regiones con carbones de baja calidad, posibilitando la instalación de gasificadores para reducir el impacto ambiental por gases como el SOx y CO. La columna de mayor probabilidad se muestra una distribución uniforme en la mezcla de los combustibles, presentando una ligera superioridad el carbón del Cesar.

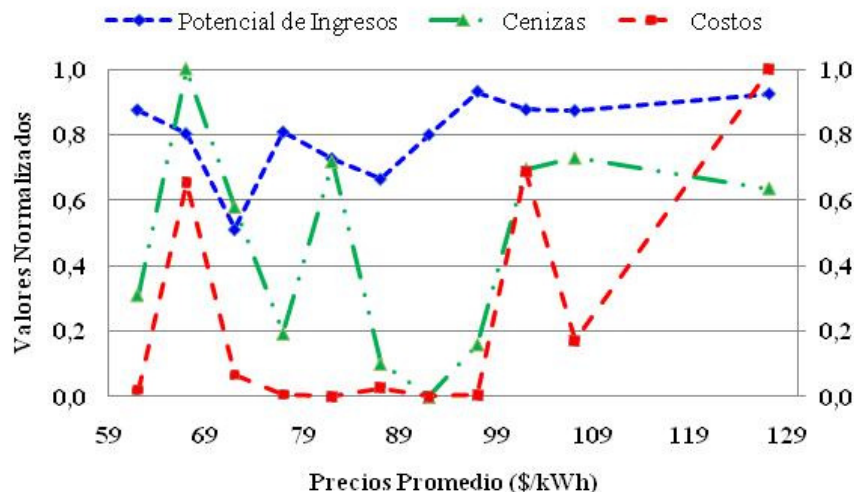


Figura 5.18. Comportamiento de los Objetivos para Precios Probables de Producto

Con los valores de F_1 , F_2 y F_3 de la Tabla 5.5, se construye la Figura 5.18, en la que la abscisa corresponde a los valores del precio promedio en cada rango dado en \$/kWh. Es importante anotar que la función objetivo 1, la cual corresponde a la “eficiencia potencial de ingresos” no es la eficiencia del sistema, pero si tiene relación con esta; además está relacionado con el costo exergetico unitario del recurso y el precio de la energía en el mercado.

La Figura 5.18, muestra algunos aspectos curiosos sobre todo el punto de precio de producto promedio más alto. En este punto, se tiene que los costos son los más altos, pero no se debe a el costo de los combustibles, pues se nota que por generar una cantidad de cenizas por encima del 0.5, la optimización eligió combustibles de baja calidad; por lo tanto, el alza en los costos debe ser debido al costo de los equipos. Si se observa detenidamente las condiciones de operación de los equipos del sistema para el precio más alto, estos operan en condiciones máximas y por ende los costos son máximos, además la relación de presiones del compresor de aire muestra un valor muy alto, por fuera de los parámetros físicos establecidos; esto hace que el precio del compresor esté excediendo los límites económicos, por lo que anteriormente se sugirió no considerar esta columna como válida. Adicionalmente, al calcular la eficiencia exergetica del sistema en el punto en cuestión, se obtiene un valor por encima de 63%, algo difícil de alcanzar bajo las condiciones planteadas.

Por otra parte, es lógico que la curva presente diferente tipo de manifestaciones y así como el punto analizado en el párrafo anterior tiene una explicación, los restantes también. Por ejemplo, si tomamos cualquier otro de los puntos, como el dos, el cual es extraño debido a que se tiene alta generación de cenizas, alto costo (de los equipos, puesto que los niveles de cenizas indican que los costos de combustibles son bajos por este concepto) y una moderada “eficiencia potencial de ingresos”, se explica porque el precio del producto en el mercado es bajo y por lo tanto se hace racionamiento en el gasto de combustible y se compensa un poco al invertir en algunos equipos con alta eficiencia, como en el caso del compresor cuya relación de presiones, nuevamente queda por encima de lo normal. De cualquier manera, es claro que el análisis hace un recorrido por las muchas posibilidades que presente el entorno. Si se hace una imagen espacial de la distribución de los puntos óptimos para cada precio, no hay una tendencia característica marcada, debido a que la optimización no evalúa directamente las relaciones entre funciones sino las posibles combinaciones de las variables de decisión para alcanzar los mejores valores de las funciones objetivo. Para este caso en concreto, a pesar que hay relaciones entre las funciones objetivo, es claro que existen variables que están relacionadas únicamente con la función objetivo donde se encuentran, que las hace independiente a las otras funciones objetivo, como es el caso del precio del producto, el cual marca la pauta en la función objetivo termoeconómica (“eficiencia potencial de ingresos”), pero no está relacionada directamente con los otros objetivos, aunque los condiciona de acuerdo al valor que tenga, por lo tanto, los puntos óptimos no tienen una estructura definida en el espacio, tal como se muestra en la Figura 5.19. De acuerdo a la Figura 5.19, se puede decir, que hay algunos puntos que tienden a inclinarse por el objetivo termoeconómico, otros al objetivo tecnológico y otros

más al ambiental, pero sin demarcar un orden específico. Los números asignados a cada punto en la Figura 5.19, hace referencia al rango de precios del producto de menor a mayor.

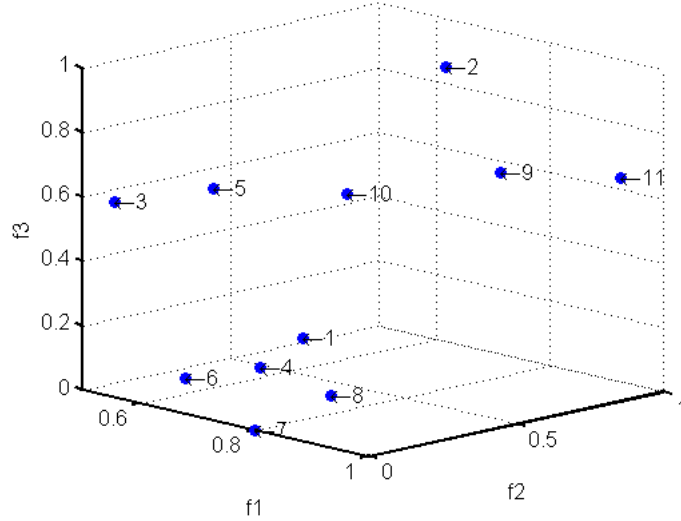


Figura 5.19. Distribución de Puntos Óptimos de los Objetivos del Problema con Variable Incierta en la Función Objetivo Termoeconómica

En la Tabla 5.8, se muestra las condiciones de operación de los equipos del CGAM en los puntos óptimos obtenidos por diferentes metodologías, escogiendo para este caso el punto con mayor probabilidad de ocurrencia en el precio, en la que se observa las variables de operación tanto para Valero et al. (1994) y Padilha et al. (2009), presentando pequeños cambios entre estas con los métodos de evaluación tradicional y el de algoritmos híbridos, respectivamente, teniendo en cuenta que las condiciones para la evaluación son las mismas; mientras que el método empleado en este trabajo de simulación-optimización (SO), se aprecian cambios notables entre las variables generados evidentemente por las alternativas de combustibles y la inclusión del precio del producto en el análisis, con lo que el método no solo debe adecuarse para encontrar el mínimo costo, sino que debe considerar las posibilidades de adquirir la mayor cantidad de ingresos y minimizar los residuos.

Tabla 5.6. Variables de Operación Óptimas para Diferentes Autores

Variable	Valor		
	Valero et al., 1994 (método tradicional)	Padilha et al., 2009 (método HA 1)	Método S+O, 2010
P_2/P_1	8.5234	8.9073	7.0600
η_{CA}	0.8468	0.8434	0.8580
$T_3 (K)$	914.28	908.46	702.28
η_{TG}	0.8786	0.8802	0.9190
$T_4 (K)$	1492.63	1487.94	1300.00

Las principales diferencias se encuentran en los valores por debajo de los métodos aplicado por Valero et al. (1994) y por Padilha et al. (2009) en la temperatura de precalentamiento del aire, la temperatura de los gases que van a la turbina y la relación de compresión en el compresor de aire. Se piensa que el algoritmo toma estos valores para el caso más probable, debido a que se presenta el argumento de un precio bajo del producto, por lo tanto, se debe utilizar los ingresos obtenidos por este concepto para solventar los costos con el fin de maximizar las utilidades restantes; mientras que la eficiencia del compresor es más alta que los otros métodos con el fin de atenuar el gasto energético en los demás equipos, aunque el costo de la turbina se incrementa por la mejora en la eficiencia.

5.5.1. Análisis Estadístico de los Resultados

Inicialmente se debe tener en cuenta que los cálculos del *VPN* para cada simulación arrojaron valores positivos, lo que indica que el proyecto es viable para todas las condiciones de precio simuladas. Se realizaron 1000 simulaciones cuyos resultados quedaron distribuidos en un 90% para los valores de *VPN* más bajos, por lo tanto, se procedió a descartar los *VPN* superiores debido a que la desviación estándar es muy alta para estas condiciones. En la Figura 5.20, se muestra como quedó distribuido porcentualmente los intervalos de valores del *VPN*. En la Figura se muestra que los valores del *VPN* pueden estar entre $\$2.9746 \times 10^{12}$ y $\$13.8562 \times 10^{12}$, pero la mayoría de valores del *VPN* se reducen al rango entre $\$2.9746 \times 10^{12}$ y $\$6.6018 \times 10^{12}$, que corresponde al 90% de todos los valores

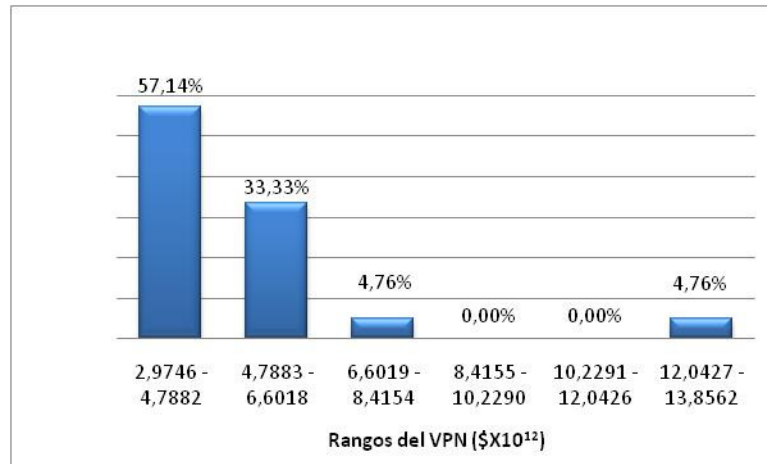


Figura 5.20. Distribución porcentual del rango de valores del *VPN* obtenido por la simulación de los precios del producto y la optimización del sistema energético.

En la Tabla 5.7, se muestra la diferencia entre la desviación estándar de todos los datos del *VPN* y la desviación estándar de los datos que conforman los dos primeros rangos de valores del *VPN*. Se nota claramente que con el 90% de los datos de las simulaciones correspondientes a los dos primeros rangos del *VPN* como se muestra en la Tabla 5.7, la desviación estándar es 2.4 veces menor que la desviación estándar para todos los valores tomados.

Tabla 5.7. Desviación Estándar del VPN para el 100% y el 90% de los Datos de la Simulación

Rangos	Desviación Estándar (DE)	Promedios (Pm)	DE ₂ /DE ₁
Rango 1 y Rango 2	DE ₁ = 9.74X10 ¹¹	Pm ₁ =4.44X10 ¹²	2.4
Todos los Rangos	DE ₂ = 2.32X10 ¹²	Pm ₂ =5.03X10 ¹²	

Por otra parte, la probabilidad de que el VPN adquiriera valores mayores a \$6.6018X10¹² es muy baja para las condiciones presentadas en el entorno del sistema. Teniendo en cuenta lo anterior se muestra en la Tabla 5.8, para los dos primeros rangos, el promedio y las desviaciones estándar para cada variable de decisión incluyendo los precios del producto.

En la Tabla 5.8, se muestran los posibles valores promedios de las variables de decisión con su la desviación, y se nota claramente que el combustible de mayor ocurrencia en la optimización no es el proveniente del Cesar (5), sino que hay una distribución algo equitativa, pero con cierta tendencia a la preferencia por combustibles de menor calidad (2-Valle del Cauca, 4-Cundinamarca y 7-Córdoba), lo que justifica la inclusión de un gasificador para aminorar los efectos ambientales que pueden generar combustibles con estas calidades.

Tabla 5.8. Promedio y Desviación Estándar de las Variables de Decisión del Sistema Energético

<i>Variables de Decisión</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>η_{GT}</i>	<i>0.414</i>	<i>0.164</i>
<i>η_{AC}</i>	<i>0.723</i>	<i>0.214</i>
<i>P_2/P_1</i>	<i>11.132</i>	<i>3.292</i>
<i>T3 (K)</i>	<i>849.353</i>	<i>247.609</i>
<i>T4 (K)</i>	<i>1213.595</i>	<i>357.885</i>
<i>X₁</i>	<i>0.077</i>	<i>0.069</i>
<i>X₂</i>	<i>0.177</i>	<i>0.191</i>
<i>X₃</i>	<i>0.126</i>	<i>0.144</i>
<i>X₄</i>	<i>0.177</i>	<i>0.145</i>
<i>X₅</i>	<i>0.072</i>	<i>0.058</i>
<i>X₆</i>	<i>0.056</i>	<i>0.059</i>
<i>X₇</i>	<i>0.246</i>	<i>0.178</i>
<i>X₈</i>	<i>0.062</i>	<i>0.059</i>
<i>Precio (\$/kWh)</i>	<i>71.387</i>	<i>19.920</i>

Sin restarle importancia al análisis estadístico, es claro que no se puede tomar una decisión en concreto del sistema, debido a que solo se tienen datos promedio y la “mejor alternativa” excluye el resto de las alternativas, por lo tanto se recurre a criterios de evaluación de alternativas, las cuales se evalúan en la siguiente sección.

5.5.2. Selección de la Alternativa Óptima por Análisis Multicriterio.

Tal como quedó planteado hasta ahora, el método simulación+optimización, generó 1000 alternativas óptimas con lo que se puede generar algún tipo de cálculo relacionado con medidas de tendencia central, pero cuyos resultados no son concluyentes debido a que cada alternativa excluye las demás, lo cual sigue siendo un problema para el decisor toda vez que requiere únicamente de una de estas alternativas, independiente de los promedios y las desviaciones obtenidas. En la sección 5.4.1, se explicó los tipos de criterios que se pueden utilizar para seleccionar una alternativa entre varias óptimas, de los cuales se tienen en cuenta para este caso el de Esperanza, Arrepentimiento y Varianza, en un modelo Jerarquizado con la siguiente estructura:

FUNCIONES OBJETIVO	Peso Local	Peso Global	Discriminación de Pesos
Eficiencia Potencial de Ingresos	w_1	$w_a = w_1 + w_2 + w_3$	$w'_1 = w_1 \cdot w_a$
	w_2		$w'_2 = w_2 \cdot w_a$
	w_3		$w'_3 = w_3 \cdot w_a$
Costos Globales	w_b	y_b	$w'_b = w_b \cdot y_b$
Cenizas	w_c	y_c	$w'_c = w_c \cdot y_c$
Sumatoria	-	$w_a + y_b + y_c = 1$	$w'_1 + w'_2 + w'_3 + w'_b + w'_c = 1$

Donde los pesos locales de la eficiencia potencial de ingresos por ser una función objetivo asociada a una variable incierta, le corresponde a cada uno de los criterios utilizados para la evaluación siendo w_1 , w_2 y w_3 los pesos para la esperanza, el arrepentimiento y la varianza respectivamente. Se debe tener en cuenta que para escoger la alternativa, todos los criterios y funciones objetivos deben estar homogenizadas, es decir, que en caso de buscar el máximo ponderado de todos los criterios y funciones objetivo, estos se deben acondicionar para requerir el máximo. En este sentido, el criterio de esperanza requiere ser maximizado, mientras que los criterios de arrepentimiento y varianza requieren ser minimizados; las funciones objetivo de costos y cenizas, requieren ser minimizados. Para que todos sean maximizados, a los criterios que requieran ser minimizados se multiplica por menos uno y se maximizan, de esta manera todos quedan para maximizar y por ende se obtiene un criterio conformado por la suma ponderada de cada criterio multiplicado por sus pesos, cuyo máximo es la posición de la alternativa óptima seleccionada.

$$\delta_i = E_i^1 \cdot w'_1 + D_i^1 \cdot w'_2 + Va_i^1 \cdot w'_3 + F_i^2 \cdot w'_b + F_i^3 \cdot w'_c \quad (5.27)$$

En la Ecuación anterior, los superíndices numéricos hacen referencia a las funciones objetivo, las cuales deben estar normalizadas, de manera que la suma ponderada δ_i , tome valores entre cero y uno para cada alternativa. La alternativa seleccionada (Ec. 5.28) corresponde a aquella que obtenga el mayor valor de la suma ponderada de los criterios evaluados:

$$(5.28)$$

$$A_{seleccionada}^{Opt} = A_i^{Opt}(\delta_i^{Max})$$

Las alternativas seleccionadas para diferentes pesos, cuyo orden es $(w'_1, w'_2, w'_3, w'_b, w'_c)$, se muestran en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Soluciones Óptimas con Diferente Juego de Pesos en los Criterios

Alternativa	648	512	685
Pesos V. D.	<i>(0.16,0.16,0.16,0.25,0.25)</i>	<i>(0.11,0.11,0.11,0.33,0.33)</i>	<i>(0.0,0.0,0.0,1.0,0.0)</i>
η_{GT}	0.451	0.464	0.714
η_{AC}	0.809	0.790	0.834
P_2/P_1	12.910	10.207	11.500
$T3 (K)$	939.30	1029.38	762.63
$T4 (K)$	1191.19	1285.45	1434.32
X_1	0.0493	0.0310	0.008
X_2	0.0049	0.2632	0.405
X_3	0.2364	0.0338	0.004
X_4	0.0603	0.0280	0.004
X_5	0.4666	0.0234	0.007
X_6	0.0477	0.0552	0.003
X_7	0.1128	0.4286	0.491
X_8	0.0493	0.1367	0.078

Se nota que no hay uniformidad en los valores de las variables de decisión por cada alternativa seleccionada, según los pesos asignados a los criterios. Pero cada alternativa representa un óptimo no dominado y puede ser seleccionada por el evaluador.

Continuación Tabla 5.9.

Alternativa	24	999
Pesos V. D.	<i>(0.0,0.0,0.0,0.0,1.0)</i>	<i>(0.0,0.5,0.0,0.4,0.1)</i>
η_{GT}	0.830	0.752
η_{AC}	0.781	0.806
P_2/P_1	13.527	10.390
$T3 (K)$	790.60	908.56
$T4 (K)$	1354.25	1369.76
X_1	0.051	0.1038
X_2	0.378	0.0081
X_3	0.127	0.3059
X_4	0.163	0.4083
X_5	0.002	0.1300
X_6	0.083	0.0171
X_7	0.045	0.0035
X_8	0.151	0.0233

Sin embargo, para otras combinaciones de pesos en los criterios de decisión se puede tener repeticiones en algunas alternativas, tal como los casos presentados a continuación:

Para pesos (0.11, 0.11, 0.11, 0.33, 0.33) la alternativa 648, se repite.

Para pesos (1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0) la alternativa es 512, se repite.

RESUMEN

Se ha mencionado que los avances en las metodologías de análisis y optimización, conllevan a planteamientos de sistemas más complejos que pueden alcanzar una solución satisfactoria bajo dichas aplicaciones metodológicas novedosas. En el caso de los sistemas energéticos no es la excepción y, juzgando por los desarrollos en la temática de optimización de sistemas energéticos, el siguiente paso sería hacer la optimización bajo incertidumbre; no obstante, sin la inclusión de las variables del entorno en el análisis este paso es absurdo, debido a que las variables internas del sistema se evalúan a nivel global bajo condiciones supuestas de certeza de las leyes físicas. Por eso, en este capítulo la inclusión de las variables del entorno es esencial para realizar la optimización bajo incertidumbre en una variable específica (precio del producto, dadas las condiciones de variación en la bolsa).

De cualquier manera, para desarrollar la optimización de un sistema energético bajo incertidumbre, la metodología aumenta su complejidad, porque requiere de un proceso de simulación de los eventos probables de la(s) variable(s) incierta(s), con lo que se puede generar miles de escenarios a optimizar, lo que complica la selección del óptimo. En un futuro se puede pensar en incluir otras variables inciertas, como el costo del recurso, el costo de los equipos, la demanda de la energía, etc., analizando los tipos de variables mencionadas anteriormente, tienen en común que no dependen del sistema interno, sino del entorno.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

La primera parte de la tesis, está encaminado a propiciar un ambiente adecuado para optimizar un sistema energético considerando las variables del entorno. En este sentido, consideramos pertinente aplicar la ecuación termoeconómica propuesta por varios autores a principios de la década del 90, la cual está relacionada con un factor de escalonamiento y un factor de condiciones de operación (parámetros exergoeconómicos) que depende fuertemente del fabricante de los equipos o sistemas. La intención de utilizar diferentes equipos para la conformación del sistema energético, conllevó a realizar el primer aporte de esta tesis, el cual fue una adecuación a la ecuación termoeconómica, ajustando dichos factores para lograr que se puedan incluir la mayor cantidad de condiciones de operación minimizando el error de los resultados obtenidos. El procedimiento utilizado, para el cual se hace necesario un estudio donde se incluyen nuevas variables para evaluar el sistema energético con la influencia del entorno, es una tarea compleja que requiere de un examen detallado debido a que se deben integrar simultáneamente varios conceptos y metodologías de manera sistemática y coherente, por lo tanto es determinante el método de ajuste de los parámetros exergoeconómicos, porque los diferentes procedimientos utilizados podrían generar un aumento incontrolable del error en los resultados finales. Uno de los aportes más importantes de esta tesis, fue enfocar el problema como un sistema global (sistema energético-entorno), este planteamiento muestra una visión diferente del sistema y permite hacer juicios que están fuera de lo común y por ende nuevas formas de optimizar el sistema globalmente, aunque haya diferenciación entre los tipos de sistemas (Lazzaretto et al., 2009).

En varias ocasiones se ha mencionado que la ecuación termoeconómica es útil cuando hay poca información sobre las condiciones de operación del equipo o sistema. Sin embargo, si la información existe, se pueden correlacionar las condiciones de operación, el desempeño y el tamaño del equipo o sistema a través de nuevos parámetros exergoeconómicos (\dot{n} , \dot{m} y \dot{B}), que se obtienen a partir de la ecuación termoeconómica. Queda abierta la propuesta para futuros trabajos, en los cuales se consideren las condiciones de operación óptimas, desempeño termodinámico definido y tamaño requerido en diferentes sistemas energéticos completos, para obtener un único sistema óptimo a partir de dichas relaciones utilizando los criterios presentados en el capítulo 2 de la tesis.

La evaluación de las ecuaciones globales del problema multiobjetivo, sin llegar a valores de optimización presentan alta variabilidad frente a pequeños cambios en la eficiencia, tienen comportamiento no lineal y está sujeta a la inclusión de variables por el efecto del entorno, lo que sugiere considerar un método no convencional para una optimización que permita encontrar diferentes alternativas

de solución y no caer en óptimos locales. Otro aporte de la tesis, es la inclusión del objetivo ambiental, desde el punto de vista de generación de residuos y su relación con la calidad del combustible, lo que muestra implicaciones importantes en la optimización como la inclusión de nuevas variables de decisión, tales como la fracción, la calidad y cantidad de los combustibles disponibles, utilizando el supuesto de no aislamiento termoeconómico, lo cual es más realista que si se considerara aislamiento termoeconómico. Desde esta perspectiva, la metodología de evaluación termoeconómica utilizando la ecuación termoeconómica se constituye en una herramienta viable para estudiar tanto aspectos internos como externos de sistemas energéticos, evitando el paso de “adaptación” al que hay que acudir para ajustar los valores de eficiencia exergética y de exergía (si analizamos la literatura, la optimización de sistemas energéticos generalmente se hace a partir de un modelo económico y un modelo físico por separado (Padilha et al., 2009; Sahoo, 2007; Tsatsaronis y Pisa, 1993), por lo que una vez optimizado el sistema, se deben llevar los datos al plano exergético). El aporte en este sentido, fue hacer la optimización directamente en el plano exergoeconómico, para luego definir en el plano físico, las condiciones de operación del sistema.

La optimización de sistemas energéticos complejos, no puede ser exclusiva del sistema interno. El entorno es importantes para definir un sistema energético adecuado amparado en los diferentes factores que ejercen influencia para decidir sobre el óptimo. Es necesario emplear métodos heurísticos para la optimización de este tipo de sistemas energéticos globales; en este caso con el uso de algoritmos genéticos multiobjetivo (AGMO), fue posible obtener las siguientes conclusiones:

- ✓ El objetivo ambiental, que generalmente es incluido en el objetivo termoeconómico (minimización de costos), ejerce una marcada influencia sobre los demás objetivos.
- ✓ Los factores del entorno intervienen en la optimización del sistema energético y le permite al decisor manejar una información general del sistema, en el que puede hacer inferencia tanto en las condiciones del sistema energético, como de los recursos que tiene a sus alrededores. Tener un sistema muy eficiente, no significa que sea el óptimo, debido a que el entorno condiciona esta premisa.
- ✓ Cuando el decisor le da más importancia al objetivo ambiental, las variables de decisión optan por tomar combustibles de buena calidad en el proceso de optimización, aunque tenga precios por encima de los demás. Lo importante de esta metodología, es que se pueden obtener mezclas óptimas de los combustibles que se utilizan, en concordancia con los requerimientos tecnológicos y la disponibilidad de recursos para hacer la inversión y las necesidades energéticas del entorno y el precio del mercado.

El problema de la mezcla de combustibles se puede focalizar desde dos puntos de vista: a) que se requiera determinar la ubicación de un sistema energético en una zona específica de un país con condiciones favorables de aprovisionamiento del combustible, cuando hay varias alternativas, en este caso la zona que gana es la que tenga mayor fracción de su combustible en la mezcla óptima y b) cuando se

tengan varios combustibles de características parecidas ubicados en misma zona o localidad y se requiera hacer mezclas optimas para el sistema-entorno. La gran cantidad de evaluaciones alcanzadas por la metodología presentada, avala el rastreo de la mayor cantidad de alternativas de la curva de óptimos de Pareto, pero lo más importante es la capacidad de relacionar los diferentes objetivos presentando resultados razonables, que sin lugar a dudas serían una herramienta imperiosa para la toma de decisiones en la construcción y funcionamiento de un sistema energético o en el mejoramiento de las condiciones de operación de un sistema energético en marcha.

Finalmente, otro de los aportes relevantes de este trabajo, es la optimización del sistema-entorno en un ambiente de incertidumbre, aplicando la metodología integrada simulación+optimización, con el que se puede concluir que el sistema depende de las condiciones irremediabilmente variables del entorno y por lo tanto, es importante evaluar el sistema frente a los posibles escenarios a los que se puede enfrentar, constituyéndose en una herramienta clave para la toma de decisiones Multicriterio en la optimización de sistemas energéticos. Un trabajo importante, sería incluir nuevas variables inciertas como el precio del producto y la demanda de la energía.

BIBLIOGRAFIA

Abido M. A. Member, IEEE. Multiobjective Evolutionary Algorithms for Electric Power Dispatch Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 10, No. 3, pp. 315 - 329. 2006.

Abido M.A. Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem. Electric Power Systems Research. Vol 79. pp. 1105–1113. 2009.

Ahadi-Oskui T., Alperin H., Nowak I., Czesla F., Tsatsaronis G. A relaxation-based heuristic for the design of cost-effective energy conversion systems. Energy . Vol. 31. pp. 1346 – 1357. 2006.

Aranda, A; Scarpellini S. Análisis de la Eficiencia Energética de la Industria Española y su Potencial de Ahorro. Centro de Investigación de Recursos y Consumos de Energéticos – CIRCE, universidad de Zaragoza. España. 2004.

Bastianoni S., Facchini A., Susani L., Tiezzi E. Emergy as a function of exergy. Energy. Vol. 32. pp. 1158 – 1162. 2007.

Bastidas B. M. Evaluación Termodinámica en Sistemas Individuales y Multisistema. Tesis de Maestría. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. 2005.

Bejan A., Tsatsaronis G. y Moran M. Thermal Design and Optimization. New York: Jhon Wiley and Sons Inc. 1996.

Bernal - Agustín J., López R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 13. pp. 2111–2118. 2009.

Biegler, L. T. Optimization. Chemical Engineering Department. Carnegie Mellon University. Pittsburgh. 2000.

Blanco J.M., Peña F. Increase in the boiler's performance in terms of the acid dew point temperature: Environmental advantages of replacing fuels. Applied Thermal Engineering. Vol. 28. pp. 777–784. 2008.

Böhringer C., Mennel T.P., Rutherford T. F. Technological change and uncertainty in environmental economics. Energy Economics . Vol. 31. pp. S1–S3. 2009.

Borchiellini R., Massardo A., Santarelli M. Carbon tax vs CO2 sequestration effects on environomic analysis of existing power plants. Energy Conversion and Management. Vol. 43. pp. 1425–1443. 2002.

Bosch M. J., Modelo Termoeconómico de una Central Térmica de Ciclo Combinado. Tesis de Magister. Medellín. 2007.

Boyd R., Krutilla K., Viscusi W. Energy Taxation as a Policy Instrument to reduce CO₂ Emissions: A Net Benefit Analysis. Journal of environmental economics and management. Vol. 29. pp. 1 – 24. 1995.

Caputo A., Pelagagge P., Salini P. Heat exchanger design based on economic optimization. Applied Thermal Engineering . Vol. 28. pp. 1151–1159. 2008.

Chaparro S., Vargas J. Gráficos de control para la media de un proceso en poblaciones con distribución asimétrica. Revista Colombiana de Estadística. Vol. 23. No 2. pp. 29 - 44. 2000.

Chejne F., Restrepo J.A. New rules for the exergo-economic optimization methodology. Energy, 2003.

Correas Uson L. C. Diagnóstico de la Operación de un Ciclo Combinado. Programa de Doctorado de Optimización Energética. Departamento de Ingeniería Mecánica. Zaragoza. 2001.

Cziesla F., Tsatsaronis G. Iterative exergoeconomic evaluation and improvement of thermal power plants using fuzzy inference systems. Energy Conversion and Management. Vol. 43. pp. 1537–1548. 2002.

Cziesla F., Tsatsaronis G., Gao Z. Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in an externally fired combined cycle power plant. Energy. Vol. 31. pp. 1472 – 1489. 2006.

Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION. Vol. 6. NO. 2. pp. 182 – 197. 2002.

Duan L., Yang Y. Comparative Study on Different IGCC Systems with Quasi-Zero CO₂ Emission. Int. J. of Thermodynamics. Vol. 10. No. 2. pp. 61-69. 2007.

El-Sayed Y, Advances in the methodologies of optimal thermal design, 1993.

El-Sayed Y. The Thermoeconomic of Energy Conversions. Elsevier. 2003.

Flores J. Método de Multiplicadores de Lagrange: Una Versión Animada. 2004.

Frangopoulos C., Caralis Y. A Method for taking into account environmental impacts in the economic evaluation of Energy Systems. Energy Convers. Mgmt . Vol. 38. No. 15-17. pp. 1751-1763. 1997.

Frangopoulus C., von Spakovsky M., Sciubba E. A brief review of methods for the design and synthesis optimization of energy systems. *Applied Thermodynamics*, 2002.

Galvan, B.; Greiner, D.; Winter, G. Una Comparativa de Algoritmos Evolutivos Multicriterio en Diseños de Sistemas de Seguridad. Segundo Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados. MAEB03, 2003.

Garcia C. Vapor en cero absoluto. 1997.

Garduno-Ramirez R., Lee K. Y. Multiobjective optimal power plant operation through coordinate control with pressure Set point scheduling. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 16, No. 2, 2001.

Giannantoni C., Lazzaretto A., Macor A., Mirandola A., Stoppato A., Tonon S., Ulgiati S. Multicriteria approach for the improvement of energy systems design. *Energy* . Vol. 30. pp. 1989–2016. 2005.

Gutierrez J. Análisis Energético y Exergético del Uso del Recursos Energético Empleado en la Empresa COOLESAR. Tesis de Pregrado. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Popular del Cesar. Valledupar. 2005.

Heinrich G., Howells M., Basson L., Petrie J. Electricity supply industry modelling for multiple objectives under demand growth uncertainty. *Energy*. Vol. 32 . pp. 2210–2229. 2007.

Jaramillo P., Smith R., Veléz I. Metodología para la priorización de zonas de intervención y proyectos de inversión en una cuenca. *Gestión y Ambiente*. Vol 6 (1), 2003.

Kelly S., Tsatsaronis G., Morosuk T. Advanced exergetic analysis: Approaches for splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts. *Energy*. Vol 34. pp. 384 – 391. 2009.

Koch C., Czesla F., Tsatsaronis G. Optimization of combined cycle power plants using evolutionary algorithms. *Chemical Engineering and Processing* . Vol 46. pp. 1151–1159. 2007.

Lazzaretto A., Tsatsaronis G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*. Vol. 31. pp. 1257–1289. 2006.

Lazzaretto A., Toffolo A. Energy, economy and environment as objectives in multi-criterion optimization of thermal systems design. *Energy*. Vol. 29. pp. 1139–115. 2004.

Lazzaretto A., Toffolo A., Morandin M., Spakovsky M. Criteria for the decomposition of energy systems in local/global optimizations. *Energy*. pp. 1 – 7. 2009.

Li Ch., Zhanga X., Zhanga S., Suzuki K. Environmentally conscious design of chemical processes and products: Multi-optimization method. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 87. pp. 233 – 243. 2009.

Li W., Chen Y., Chen Y. Generalizing TOPSIS for Multi-criteria Group Decision-making with Weighted Ordinal Preferences. *IEEE*. pp. 7505 - 7508. 2008.

Li, P.; Löwe, K.; Arellano-Garcia, H.; Wozny, G. Integration of Simulated Annealing to a Simulation Tool for Dynamic Optimization of chemical processes. Technische Universität Berlin, Institut für Prozeß- und Anlagentechnik, Straße des 17. Juni 135, Berlin 10623, Germany. *Chemical Engineering and Processing*. 2000.

Lindenberger, D. Energy-Dependent Production Functions and the Optimization Model “PRISE” of Price-Induced Sectoral Evolution. *Journal Applied Thermodynamics*. Vol. 5 (No. 3) pp 101-107. Würzburg, Germany. 2002.

Lozano, A., Valero, A. Theory of the Exergetic Cost. *Energy* Vol. 18. No. 9, pp 939 - 960. Great Britain. 1993.

Mazur V. Fuzzy thermoeconomic optimization of energy-transforming systems. *Applied Energy*. Vol. 84. pp. 749 – 762. 2007.

Meyer L., Tsatsaronis G., Buchgeister J., Schebek L. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy*. Vol. 34. pp. 75–89. 2009.

Mirandola A., Stoppato A. A viable approach to the optimization of energy systems. *Applied thermodynamics*, 2003.

Padilha R., Santos H., Colaço M., Cruz M. Single and Multi-Objective Optimization of a Cogeneration System Using Hybrid Algorithms. *Heat Transfer Engineering*. Vol 30. No 1,2. pp. 37 - 41. 2009.

Paulus D., Tsatsaronis G. Auxiliary equations for the determination of specific exergy revenues. *Energy*. Vol. 31. pp. 3235 – 3247. 2006.

Pelet X., Favrat D., Leyland G. Multiobjective optimisation of integrated energy systems for remote communities considering economics and CO2 emissions. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 44. pp. 1180 – 1189. 2005.

Qin X.S., Huang G.H., Zeng G.M., Chakma A., Huang Y.F. An interval-parameter fuzzy nonlinear optimization model for stream water quality

management under uncertainty. *European Journal of Operational Research*. Vol. 180. pp.1331–1357. 2007.

Quin X., Huang G., Zeng G., Chakma A., Huang Y. An interval-parameter fuzzy nonlinear optimization model for stream water quality management under uncertainty. *European Journal of Operational Research* Vol 180. pp. 1331–1357. 2007.

Restrepo J. y Chejne F. Simulación y Análisis Termoeconómico de la Utilización del Gas en la Repotenciación de una Central Térmica. Tesis Especialización en Gases Combustibles. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín 2002.

Rojas G., I. Análisis de Exergía en dos Puntos Críticos en una Industria Productora de Harina de Pescado. Tesis de Maestría. Universidad de Puerto Rico. 2005.

Rosen M., Dincer I. Exergoeconomic analysis of power plants operating on various fuels. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 23. pp. 643–658. 2003.

Sahoo P.K. Exergoeconomic analysis and optimization of a cogeneration system using evolutionary programming. *Applied Thermal Engineering*. pp. 1 – 9. 2007.

Salazar D. Tesis Doctoral: Acerca de la incertidumbre y la robustez en toma de decisiones multicriterio basada en optimización evolutiva. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria Departamento de Informática y Sistemas. 2008.

Salazar D., Rocco C., Zio E. Robust reliability design of a nuclear system by multiple objective evolutionary optimization. *Int. J. Nuclear Knowledge Management*. Vol. 2. No. 3. pp.333 - 345. 2007.

Smith, R y otros, Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 2000.

Sonnemann G., Schuhmacher M., Castells F. Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 11. pp. 279 – 292. 2003.

Toffolo A., Lazzaretto A. Evolutionary algorithms for multi-objective energetic and economic optimization in thermal system design. *Energy*. Vol. 27. pp. 549 – 567. 2002.

Torres C. y Valero A. Curso de doctorado en termoeconomía. Universidad de Zaragoza. 2001.

Torres C. y Valero A., Curso de Doctorado en Termoeconomía. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza. España. 2001.

Tsatsaronis G. Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy System. *Progress in Energy and Combustion*. Vol. 19. pp. 227 – 257. 1993.

Tsatsaronis G. Auxiliary Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. Energy. Germany. 2007.

Tsatsaronis G., Pisa J. Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems – Application to the CGAM problem. Energy. U.S.A. 1993.

Uche M. F. Análisis Termoeconómico y Simulación de una Planta Combinada de Producción de Agua y Energía. Tesis Ph.D., Zaragoza. 2000.

Unidad de Planeación Minero Energética -UPME-. Boletín estadístico de minas y energía 2003-2008. Bogotá 2008.

Vahidinasab V., Jadid S. Multiobjective environmental/techno-economic approach for strategic bidding in energy markets. Applied Energy. Vol. 86. pp. 496 – 504. 2009.

Valero, A. Termoeconomía: El Punto de Encuentro de la Termodinámica, la Economía y la Ecología. Jornadas en homenaje a Nicholas Georgescu-Roegen. 1998.

Von V., Phil M., Kelly S. Energy Systems Improvement based on Endogenous and Exogenous Exergy Destruction. Berlín. 2008.

Wang L. y Singh C., Environmental/economic power dispatch using a fuzzified multi-objective particle swarm optimization algorithm. Electric Power System Research. Vol 77. p.p. 1654-1664. 2007.

Wischhusen St. y Schmitz G. Transient Simulation as an Economical Analysis Method for Energy Supply Systems for Buildings or Industry. Department of Technical Thermodynamics, Technical University Hamburg, Germany. 2004.

Worrell, E.; Laitner, J.; Ruth, M; Finman, H. Productivity Benefits of Industrial Energy Efficiency Measures. Energy Analysis Department, Lawrence Berkeley National Laboratory. U.S.A. 2001.

Zapata C.J., Campos E. Valoración de confiabilidad de sistemas de generación con recursos limitados de energía utilizando simulación de Montecarlo. Scientia et Technica Año XI. No 29. pp. 43 – 48. 2005.

<http://economia-excel.blogspot.com/2009/02/simulacion-de-monte-carlo.html>

http://www.exa.unicen.edu.ar/catedras/inv_op/apuntes/Apunte_Teorico_MC_2005.pdf

<http://hackelare.wordpress.com/2009/11/25/metodo-topsis-soporte-para-la-toma-de-decisiones/>